

**ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS**

**ŽEMĖS ŪKIO INŽINERIJOS FAKULTETAS**

Energetikos ir biotechnologijų inžinerijos institutas

**Andrius Ridikas**

# **AUTONOMINĖS SAULĖS ELEKTRINĖS TYRIMAS**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Studijų sritis: Technologijos mokslai

Studijų kryptis: Energijos inžinerija

Studijų programa: Agroenergetikos inžinerija

Akademija, 2014

Baigiamųjų darbų vertinimo komisija:

(Patvirtinta Rektoriaus 2014 m. gegužės 6 d. įsakymu Nr. 144-PA)

Pirmininkas: Prof. Saulius GUDŽIUS, Kauno technologijos universitetas

Nariai:

1. Doc. dr. Jonas ČĖSNA, Aleksandro Stulginskio universitetas
2. Doc. dr. Kęstutis NAVICKAS, Aleksandro Stulginskio universitetas
3. Prof. dr. Stasys SLAVINSKAS, Aleksandro Stulginskio universitetas
5. Direktorius, inž. Vytautas GRUŠAUSKAS, Žuvininkystės taryba prie LR Žemės ūkio ministerijos.

Mokslinis vadovas                      Doc. dr. Kęstutis Navickas, Aleksandro Stulginskio universitetas

Recenzentas                                Lekt. dr. Kavolynas Antanas, Aleksandro Stulginskio universitetas

Instituto direktorius                    Doc. dr. Kęstutis Navickas, Aleksandro Stulginskio universitetas

Oponentas                                    Doc. dr. Antanas Pocius, Aleksandro Stulginskio universitetas

ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS  
ŽEMĖS ŪKIO INŽINERIJOS FAKULTETAS  
ENERGETIKOS IR BIOTECHNOLOGIJŲ INŽINERIJOS INSTITUTAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

AUTONOMINĖS SAULĖS ELEKTRINĖS TYRIMAS

Autorius: Andrius Ridikas  
Vadovas: Doc. dr. Kęstutis Navickas  
Kalba – lietuvių

Darbo apimtis – 47 p.  
Lentelių skaičius – 2  
Paveikslų skaičius – 27  
Naudota informacijos šaltinių – 35  
Priedų skaičius – 1

**Santrauka**

Šio darbo tikslas yra ištirti individualaus namo elektros energijos dinamiką ir nustatyti energijos poreikių tenkinimo galimybes naudojant saulės energijos konversijos sistemą.

Tyrimo metu nustatyti pagrindiniai saulės šviesos elektrinės parametrai. Analizuojant sukauptus duomenis nustatyta, kad vidutiniškai per vieną mėnesį individualus gyvenamasis namas suvartoja apie 321 kWh elektros energijos, o saulės elektrinė pagamina apie 1058 kWh elektros energijos. Saulės elektrinės išnaudojimo koeficientas buvo didžiausias žiemos laikotarpiu ir siekė apie 0,46, o mažiausias – vasaros laikotarpiu ir siekė apie 0,17.

**Reikšminiai žodžiai:** Autonominė saulės elektrinė, saulės spindulinė energija, energijos vartojimo dinamika, išnaudojimo koeficientas.

ALEKSANDRAS STULGINSKIS UNIVERSITY  
FACULTY OF AGRICULTURAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF ENERGY AND BIOTECHNOLOGY ENGINEERING

Master theses

EVALUATION OF AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

Author: Andrius Ridikas  
Supervisor: Doc. dr. Kęstutis Navickas  
Language – Lithuanian

Pages – 47 p.  
Tables – 2  
Pictures – 27  
Sources of literature – 35  
Annexes – 1

## Summary

Aim of this work is to investigate the individual house energy dynamics and determine the energy needs of the possibilities of using solar energy conversion system.

The research identified major solar power plant parameters. The analysis of the collected data showed that, on average within one month of individual house uses about 321 kWh of electricity, solar power plant produces about 1058 kWh of electricity. Solar power plant efficiency was highest during the winter and was about 0.46, and the lowest was during the summer and was about 0.17.

**Keywords:** Standalone solar power plant, solar radiation energy, energy consumption dynamics, efficiency.

# TURINYS

SIMBOLIŲ, SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS .....	6
ĮVADAS .....	7
1. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ ANALIZĖ .....	8
1.1. Saulės energijos potencialo panaudojimas Lietuvoje ir pasaulyje.....	8
1.2. Saulės energijos konversijos į elektros energiją principai ir technologijos .....	11
1.3. Saulės elektrinės .....	15
1.4. Naujos medžiagos fotoelementų gamybai .....	16
1.5. Saulės energijos konversija į elektros energiją nenaudojant puslaidininkinių medžiagų ..	19
1.6. Naujas saulės elementų pagrindas .....	20
1.7. Plastikiniai fotoelementai .....	21
1.8. Saulės energijos konversijos ir akumuliavimo įrenginiai .....	22
1.9. Saulės elektrinių diegimo ekonominiai rodikliai .....	24
1.10. Klimato sąlygų įtaka saulės elektrinių naudojimui.....	24
1.11. Apibendrinamosios išvados .....	27
2. TYRIMŲ TIKSLAS IR UŽDAVINIAI .....	28
3. TYRIMŲ METODIKA .....	29
3.1. Tyrimų objektas .....	29
3.2. Saulės spinduliuotės potencialo ir jėgainės darbo nustatymo metodika.....	30
3.3. Saulės jėgainės tyrimų metodika .....	31
3.4. Autonominės saulės elektrinės akumuliatorių baterijų tyrimo metodika .....	32
4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS .....	34
4.1. Autonominės saulės šviesos elektrinės generuojamos galios dinamika .....	34
4.2. Individualaus namo elektros energijos poreikių tenkinimas naudojant saulės elektrinę ...	36
4.3. Autonominės saulės elektrinės išnaudojimo koeficiento ir saulės apšvietos dinamika.....	39
4.4. Autonominės saulės elektrinės baterijų įkrovos ir iškrovos dinamika .....	40
IŠVADOS .....	43
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	44
MOKSLINIO DARBO APROBACIJA .....	47
PRIEDAI .....	48
<i>1 Priedas</i> .....	48

## SIMBOLIŲ, SANTRUMPŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS

$\lambda$  – bangos ilgis, m;

$c$  – šviesos greitis ( $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s);

$h$  – Planko konstanta ( $6,62606896 \cdot 10^{-34}$  J · s).

$E_p$  – saulės elektrinės energijos gamybos potencialas;

$G_a$  – vidutinė valandos saulės energinė apšvieta, kWh/m<sup>2</sup>h;

$A_m$  – saulės elektrinės modulių aktyvusis plotas, m<sup>2</sup>;

$\eta_{el}$  – saulės elektrinės modulių energinės konversijos efektyvumas ( $\eta_{el} = 0,15$ );

$\tau_{el}$  – saulės elektrinės efektyvusis darbo laikas, h;

$\eta$  – saulės elektrinės išnaudojimo koeficientas;

$E_s$  – metinės elektros energijos sąnaudos, kWh;

$E_p$  – saulės elektrinės metinis elektros energijos gamybos potencialas;

$E_s$  – metinės elektros energijos sąnaudos, kWh;

$P_i$  – i-ojo imtuvo galia, kW;

$\tau_i$  – i-ojo imtuvo metinis darbo laikas, h;

$\theta$  – akumuliatorių įkrovos lygis, %;

$\theta_0$  – pradinis akumuliatorių įkrovos lygis, %;

$T_N$  – nominali akumuliatoriaus talpa, Ah;

$\delta_I$  – srovės nuostolių koeficientas (0,98 – 1);

$I_i$  – akumuliatoriaus įkrovos srovė, A;

$\Delta t$  – matavimo laikas, h.

## IVADAS

Energetikos sistemos susidūrė su dideliais iššūkiais. Būtinumas sukurti adekvačius ir racionalius sprendimus yra skatinamas keliančių nerimą pasaulinio energijos poreikio tendencijų (prognozuojamas 60 % augimas per ateinančius 30 metų), poreikio pažaboti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas bei mažinti sukrečiančias klimato kaitos pasekmes, taip pat suvaldyti naftos kainų nepastovumą ir geopolitinį naftos tiekėjų nestabilumą [1].

Vienas iš labiausiai besivystančių atsinaujinančios energijos šaltinių yra fotoelektra. „Fotoelektra“ išvertus reiškia elektrą iš šviesos: *foto* (graikiškai *phos*) reiškia šviesą, *volt* – kildinamas iš Italijos mokslininko *Alessandro Volta* pavardės, kuris pirmasis tyrinėjo šį efektą [1].

Fotoelektros technologijos, pradėtos vystyti 1950 metais taikymams kosmose, turi daug privalumų: jos yra modulinės, švarios, saugios, nesudėtingai naudojamos ir gali būti instaliuotos beveik bet kur, kur tik reikia vartotojui. Pagaminta elektra gali būti naudojama tiesiogiai arba čia pat vietoje kaupiama arba tiekiami į veikiančią elektros tinklą. Fotoelektriniai moduliai gali būti paprastai integruojami į plataus vartojimo prekes, montuojami ant namų stogų bei sienų arba į dideles saulės elektrines [1].

Didėjantis elektros energijos poreikis pasaulyje didina ir aplinkos taršą. Darbatiniai elektros energijos generavimo būdai labai teršia aplinką, todėl yra ieškoma būdų kaip tą taršą sumažinti panaudojant atsinaujinančius energijos šaltinius. Amerikoje nuo 1949 m. iki 2000 m. elektros energijos suvartojimas išaugo nuo 0,3·10<sup>12</sup> kWh iki 3,8·10<sup>12</sup> kWh. Šiais laikais pasaulyje yra suvartojama apie 14·10<sup>12</sup> kWh, o iki 2020 metų yra planuojama, kad elektros energijos bus suvartota apie 17·10<sup>12</sup> kWh. Pasauliniu mastu kiekvienais metais elektros energijos suvartojimas išauga apie 1,6 %. Lietuvoje šiuo metu yra suvartojama maždaug 1010 kWh, t.y. apie 0,7 % visame pasaulyje sunaudojamos elektros energijos [2].

Visame pasaulyje skiriamas vis didesnis dėmesys atsinaujinantiems energijos šaltiniams, nes tai yra neišsenkantis energijos šaltinis, neteršia aplinkos, sumažina teršalų išmetimą į aplinką.

### **Mokslinė hipotezė:**

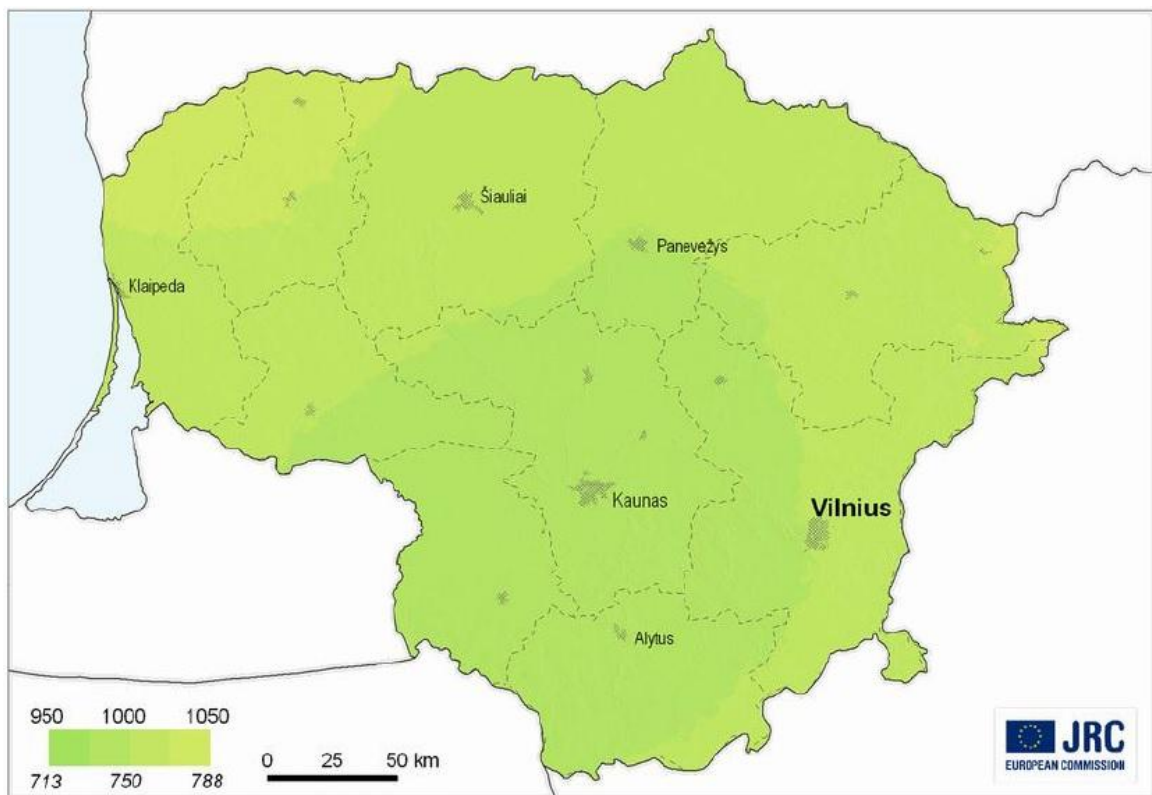
Autonominė saulės elektrinė gali visiškai patenkinti individualaus namo elektros energijos poreikius.

# 1. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ ANALIZĖ

## 1.1. Saulės energijos potencialo panaudojimas Lietuvoje ir pasaulyje

Lietuvos teritorija užima 65 200 km<sup>2</sup> plotą. Įvairiose Lietuvos vietovėse per metus į horizontalaus paviršiaus kvadratinį metrą patenka nuo 926 kWh/m<sup>2</sup> metus (Biržai) iki 1042 kWh/m<sup>2</sup> metus (Nida) saulės spindulinės energijos. Vidutiniškai Lietuvoje krintanti energija sudaro ~1000 kWh/m<sup>2</sup> metus. Tokiu būdu į Lietuvos teritoriją patenka 6,54.10<sup>13</sup> kWh/metus. Lietuvoje yra ~150 km<sup>2</sup> namų stogų, kurie gali būti panaudoti saulės elektrinėms įrengti. Į juos krinta 1,5.10<sup>11</sup> kWh/metus saulės spindulinės energijos. Esant saulės elementų efektyvumui 15%, iš jėgainių, įrengtų ant stogų, galima gauti 2,25.10<sup>10</sup> kWh/metus [2].

Kauno rajone Virbališkių kaime esanti saulės spinduliuotė fiksuotai sistemai yra 1180 kWh/m<sup>2</sup> per metus, o optimaliausias kampas yra 37° nuo vertikalės, pietų kryptimi [3].



1.1 pav. Lietuvos saulės elektrinio potencialo žemėlapis [3]

Šiuo metu Lietuvos elektros energijos gamintojų galingumai leidžia pagaminti 2,27.10<sup>10</sup> kWh/metus. Taigi, įrengtos ant visų namų stogų, saulės elektrinės turėtų galią, lygią Lietuvos elektros jėgainių galiai. Krintanti į žemės paviršių saulės spindulinė energija kinta priklausomai nuo metų laiko, paros laiko ir meteorologinių sąlygų. Energija, krintanti lapkričio, gruodžio,

sausio mėnesiais, sudaro tik 10% energijos, krintančios gegužę, birželį, liepą. Naktį energija artima nuliui, stipriai apniukusią dieną sudaro tik kelis procentus nuo giedrą dieną krintančios energijos. Saulės elektrinę, naudojant kaip vienintelį elektros energijos šaltinį, galima panaudoti tik esant galimybei akumuliuoti jos pagaminamą elektros energiją, šitaip kompensuojant elektros energijos nepakankamumą, sukeltą sezoninių, paros ir meteorologinių kitimų. Šiuo metu yra naudojami trys elektros energijos akumuliacijos būdai: elektros akumuliatoriuose, vandens akumuliaciniuose baseinuose ir jungiantis prie valstybinio elektros tinklo per reversinius skaitiklius. Perspektyvus kompensacijos būdas - jungimas kartu su vėjo jėgaine. Taip pat esama atvejų, kai akumuliacija nereikalinga (pvz., tiltų, požeminių įrengimų katodinė apsauga) [4].

Nepaisant to, kad fotoelektros potencialas nepalyginamai didesnis už kitų atsinaujinančių energijos rūšių potencialą kartu sudėjus ir kad ji yra ekologiškiausia, jos plėtrą stabdo didžiausia instaliuoto vato kaina, kuri kol kas keletą kartų viršija įprastinės elektros energijos kainą. Siekiant sumažinti instaliuoto vato kainą yra didinamas saulės fotoelementų efektyvumas, kad iš tokio pačio ploto būtų galima gauti didesnę elektros energijos kiekį, o tai sumažintų ir fotoelektrinio elemento kainą. Šią situaciją iš esmės gali pakeisti tik naujos technologijos ir naujos medžiagos [4].

Svarbiausias veiksnys, neigiamai veikiantis pasaulinę, o taip pat ir ES fotoelektros rinką, yra saulės elektrinių gaminamos elektros energijos kaina, nes, lyginant su elektros kainos vidurkiu 0,07 – 0,12 Lt/kWh (0,02 – 0,035 EUR/kWh), ji yra brangiausia ir siekia 0,86-2,07 Lt/kWh (0,25 – 0,6 EUR/kWh). Net pridėjus CO<sub>2</sub> mažinimo aplinkoje sąnaudas, ji vis tiek būtų didelė 0,14– 0,19 Lt/kWh (0,04 – 0,055 EUR/kWh). Būtina vertinti ne tik vidinę savikainą, bet ir išorines sąnaudas (atominės elektrinės atliekų utilizavimas ir saugojimas, šiluminių elektrinių tarša ir susijusios socialinės problemos). Prognozuojama, kad įprastinės elektros kaina 2020 metais kils iki 0,17 – 0,21 Lt/kWh (0,05 – 0,06 EUR/kWh), o saulės elektrinių pagamintos elektros sąnaudos pagal prognozes turi kristi, taigi fotoelektra taps konkurencinga tradiciniais būdais generuojamai elektros energijai [4]. 1.1 lentelėje pateikti duomenys rodo metinę instaliacijų galią, elektros energijos gamybą, apytikrį CO<sub>2</sub> emisijų mažėjimą ir naujų darbo vietų skaičiaus sukūrimą iki 2025 m.

**1.1 lentelė** Fotoelektros rinkos augimo perspektyvos pasaulyje iki 2025 m. [5].

Metai	Metinė instaliacijų galia	Elektros energijos gamyba	Apytikris CO <sub>2</sub> emisijų mažėjimas	Darbo vietų skaičiaus sukūrimas
	GW	TWh	mln. tonų/metus	x 10 <sup>3</sup>
2006	1,88	9	5	74
2010	5,61	29	17	229

## 1.1 lentelės tęsinys

Metai	Metinė instaliacijų galia	Elektros energijos gamyba	Apytikris CO <sub>2</sub> emisijų mažėjimas	Darbo vietų skaičiaus sukūrimas
	GW	TWh	mln. tonų/metus	x 10 <sup>3</sup>
2015	16,77	102	61	651
2020	34,1	276	165	1893
2025	55,34	589	353	3249

Šiuo metu pasaulyje dominuoja dvi pagrindinės priemonės, leidžiančios efektyviai mažinti fotoelektros sąnaudas, tai gamybos apimčių didinimas ir inovacijos. Atsižvelgiant į laiką, reikalingą energetikos infrastruktūros esminiam pakeitimui, reikės dar 20–30 metų, kad fotoelektra galėtų pakeisti dalį tradicinių energijos šaltinių, t.y 2040 m. fotoelektra padengtų 2% pasaulinės elektros energijos suvartojimo [4].

Autonominės saulės elektrinės turi turėti fotoelektrinius modulius, akumulatorius, inverterius, įkrovimo valdiklius, vėjo ar rezervinius elektros generatorius. Fotoelektrinių elementų kaina siekia 25–35% visos saulės elektrinės kainos. Kiekviena saulės elektrinė projektuojama individualiai. Todėl prognozuoti iki 2025 m. investicijų dydį yra labai sudėtinga. Įvertinus numatomą instaliuojamą galią, dabartinę fotoelektrinių modulių kainą, jos kitimo tendencijas [4] ir kainos dedamąją ( $\cong 30\%$ ) visoje saulės elektrinės sistemoje, buvo apytikriai apskaičiuotos investicijos (1.2 lentelė).

## 1.2 lentelė Saulės elektrinėse pagamintos energijos ir instaliuotos galios prognozė iki 2025 m. [4]

Metai		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Energijos gamyba	GWh	0,035	0,046	0,060	0,078	0,101	0,132	0,171	0,223	0,290
	ktne	0,003	0,004	0,005	0,007	0,009	0,011	0,015	0,019	0,025
Galia	MW	0,05	0,07	0,09	0,11	0,14	0,19	0,24	0,32	0,41
Investicijos	mln. Lt	2,44	2,69	3,03	3,40	3,93	4,70	5,46	6,07	6,98

## 1.2 lentelės tęsinys

Metai		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Energijos Gamyba	GWh	0,376	0,489	0,636	0,827	1,075	1,397	1,817	2,362	3,070
	ktne	0,032	0,042	0,055	0,071	0,092	0,120	0,156	0,203	0,264
Galia	MW	0,54	0,70	0,91	1,18	1,54	2,00	2,60	3,37	4,39
Investicijos	mln. Lt	7,96	9,53	11,49	14,28	18,33	21,77	24,79	28,53	32,63

Nepaisant saulės elektrinių privalumų, (neteršia aplinkos, neišsenkantis energijos šaltinis, nereikalaujanti didelės priežiūros) jos vartojimą riboja didelė saulės energijos kaina, jų

pagaminamos elektros kaina yra didesnė nei elektra, gaunama iš kitų elektros energijos šaltinių [6].

Labiausiai saulės energijos kainos dydžiui įtaką daro žaliavų kaina. Fotoelementai gaminami iš silicio plokštelių, kurios gaunamos iš supjaustytų silicio kristalų, žaliavos kainą sudaro iki 70 % saulės energijos kainos [6].

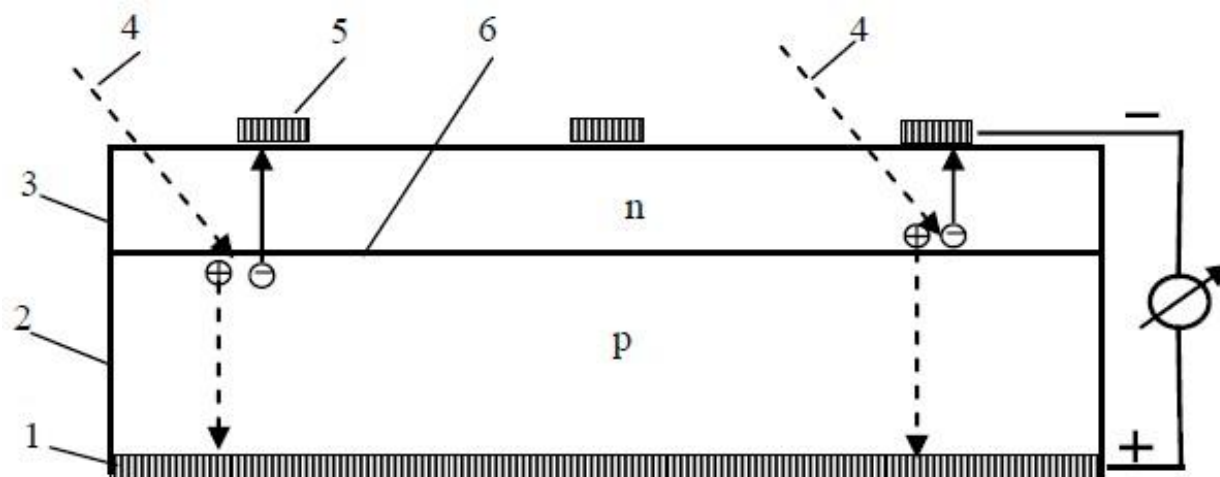
Kiekvienais metais sparčiai augantis SoG-Si poreikis žymiai pranoko anksčiau darytas prognozes. Buvo numatyta, kad 2005 m. bus sunaudota 9995 tonos SoG-Si, tačiau jo buvo sunaudota 1,5 karto daugiau (16000 tonų). Lietuvos kvarcinio smėlio kiekis pakankamas AB „Anykščių kvarcas“ gamyklai, kuri galėtų pagaminti 2-3 tūkst. tonų silicio per metus. Šio smėlio kiekio užtektų daugeliui metų [6].

Dėl ribotų technologinių pajėgumų gaminant saulės elementams tinkamą žaliavą, pastaruoju metu pastebimas gana didelis nukrypimas nuo prognozuotos fotoelektros gamybos kainos mažėjimo tendencijos. Dėl silicio žaliavos kainos augimo fotoelektrinių elementų gamyba tampa vis mažiau pelninga ir Europos Sąjungoje fotoelektrinių elementų gamintojai vis sunkiau konkuruoja su Kinijos gamintojais, siūlančiais rinkai pigius (dėl pigios darbo jėgos Kinijoje) fotoelektrinius elementus. Todėl kalbant apie situaciją Europos Sąjungos pramonės šakose, susijusiose su fotoelektra, reikia įvardyti problemas, kurias turi spręsti įmonės, norėdamos išsaugoti savo vietą fotoelektros rinkose [6].

## **1.2. Saulės energijos konversijos į elektros energiją principai ir technologijos**

*Fotoelektra* – tai elektros energija, kuri yra tiesiogiai konvertuojama iš saulės spindulinės energijos pasitelkiant fotoelektrinius elementus. Fotoelektrinis elementas, naudodamas fotoefektą, saulės spinduliuotę tiesiogiai paverčia į elektros energiją. Jei puslaidininkio plokštelę (pavyzdžiui, silicio) apšviesime saulės spinduliais, tai saulės energijos paveikti plokštelę sudarančių atomų išorinėse orbitose esantys elektronai, gali nutraukti traukos ryšius su branduoliais ir pradėti judėti po visą plokštelę. Atomai, kurie tokiu būdu netenka elektronų, tampa teigiamai įelektrinti. Vietos, kuriose trūksta elektronų, fizikoje vadinamos „skylėmis“. Neigiami (n) krūvininkai yra elektronai, o teigiami krūvininkai (p) – skylės. Skylės taip pat gali judėti po visą plokštelę. Bet šie teigiami ir neigiami krūvininkai chaotiškai juda po visą plokštelę. Nuolatinis elektros laukas galėtų paskirstyti krūvininkus. Kad atsirastų šis laukas, silicio plokštelę reikia legiruoti, vieną pusę fosforu, o kitą pusę boru. Vienoje plokštelės pusėje susidaro „p“ tipo laidumas legiravus ją boru, o „n“ tipo laidumas atsiranda legiravus fosforu. Šioje vietoje susidaro p-n sandūra, kuri ir sukuria elektros lauką. Elektronus ir skyles susidaręs elektros laukas verčia judėti į „n“ ir „p“ tipo silicij. Viršutinėje ir apatinėje plokštelės pusėje

sudarius elektrodus ir suformavus uždara grandinę, joje atsiranda nuolatinė elektros srovė. Viršutinis elektrodas dažniausiai yra tinklelis, o apatinis – vientiso metalo plokštelė (1.2 pav.). Viršutinis elektrodas yra neigiamasis, o apatinis elektrodas yra teigiamas polius. Kad būtų atspindėta mažiau saulės spindulių, silicio viršutinis paviršius yra padengiamas antireflektyvia plona skaidria danga [7].



**1.2 pav.** Fotelektrinio silicio elemento schema: 1 – apatinis kontaktas; 2 – silicis su boro priemaiša; 3 – silicis su fosforo priemaiša; 4 – fotonas; 5 – viršutiniai kontaktai; 6 – p-n sandūra [7]

Fotelektriniai elementai dažniausiai yra gaminami skritulio arba kvadrato formos. Esant  $1000 \text{ W/m}^2$  saulės apšvietai, 100-150 mm dydžio silicio fotelektrinis elementas generuoja apie 0,5-0,6 V įtampą ir 2-3 A stiprio elektros srovę. Norint gauti didesnę įtampą, fotelektrinius elementus reikia sujungti nuosekliai. Šitaip sujungus fotelektrinius elementus galima įdėti į korpusą, uždenkti skaidria danga bei užsandarinti. Tokiu būdu yra gaminami fotelektriniai moduliai. Dažniausiai moduliai gaminami tokių parametrų: 12 V, 2-3 A ir 24-36 W. Taip pat yra nagrinėjami ir iš kitokių puslaidininkių medžiagų gaminami fotelektriniai moduliai: kadmio telūrido (CdTe), galio arsenido (GaAs), vario indžio diselenido (CIS), indžio fosfido (InP), vario indžio galio selenido (CIGS) ir kt. Bet didžiausią rinkos dalį užima silicio pagrindu pagaminti fotelementai - apie 98%. Šiems moduliams yra naudojamas amorfinis, monokristalinis ir polikristalinis silicis. Šiuo metu gaminamų fotelektrinių modulių naudingumo koeficientai yra tokie [7]:

- monokristalinio silicio – 16-18%,
- polikristalinio silicio – 13-16%,
- amorfinio silicio – 8-10%.

Fotoelektriniai elementai laboratorijose pagaminami ir didesnio naudingumo koeficiento: monokristaliniam – 24%, polikristaliniam – 18%, amorfiniam siliciui – apie 13%. Tikimasi, kad per keletą metų padidės ir pramoniniu būdu gaminamų fotoelektrinių elementų naudingumo koeficientas. Monokristaliniai fotoelementai yra gaminami iš 200-300  $\mu\text{m}$  storio monokristalinio silicio plokštelių. Šių plokštelių garantinis tarnavimo laikas yra apie 20 metų. O polikristalinių fotoelementų tarnavimo laikas yra apytiksliai 10 metų. Amorfinio silicio fotoelementų plėvelės storis yra gerokai mažesnis, todėl šie elementai yra pigesni. Tačiau jų efektyvumas laikui bėgant šiek tiek mažėja. Puslaidininkinės medžiagos yra skirtingos, todėl į elektros energiją yra konvertuojamos tik tam tikro ilgio saulės spinduliuotės bangos. Fotono energija  $E$  (J) yra lygi [7]:

$$E = h c / \lambda , \quad (1)$$

čia  $\lambda$  – bangos ilgis, m;

$c$  – šviesos greitis ( $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s);

$h$  – Planko konstanta ( $6,62606896 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ).

Norint perkelti elektroną iš valentinės juostos į laidumo juostą, yra reikalinga fotono energija, kuri kristaliniam siliciui yra lygi 1,12 eV, galio arsenidui ir kadmio telūridui 1,43-1,44 eV, o amorfiniam siliciui - 1,75 elektronvolto. Jeigu yra nepakankamai fotono energijos, norint elektroną perkelti iš atomo orbitos į laidumo juostą, tai ši energija pavirsta į šilumą. O jeigu yra energijos perteklius, tada taip pat ši energija virsta į šilumą, nes yra niekur nepanaudojama [7].

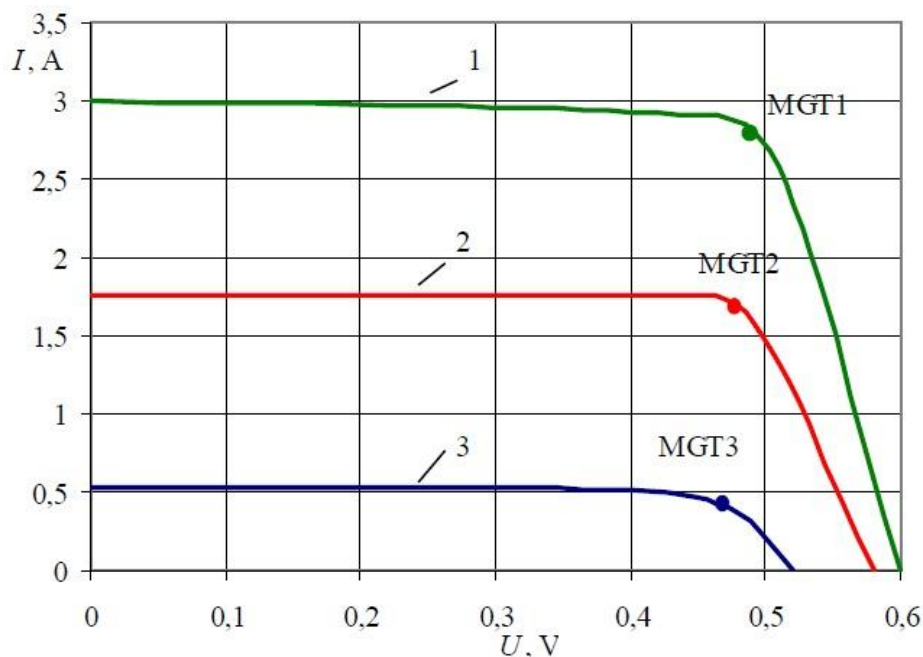
Todėl teorinė kristalinio silicio efektyvumo riba yra apie 28%. Siekiant padidinti kristalinio silicio efektyvumą, yra atliekami tyrimai su fotoelementais, kurie apimtų visą saulės spinduliuotės spektrą. Šie fotoelektriniai moduliai yra sudaryti iš skirtingų medžiagų sluoksnių, kurios pasižymi skirtingais elektrono išlaisvinimo energijos lygiais [7].

Viena iš reikšmingiausių fotoelektrinio elemento charakteristikų yra srovės-įtampos (1.3 pav.). Šios charakteristikos svarbiausi parametrai yra tokie [7]:

- trumpojo jungimo srovė  $I_{ij}$ , kai įtampa  $U = 0$  ;
- tuščios veikos įtampa  $U_{iv}$ , kai  $I = 0$  ;
- srovė  $I_m$  ir įtampa  $U_m$  maksimalios galios taške MGT.

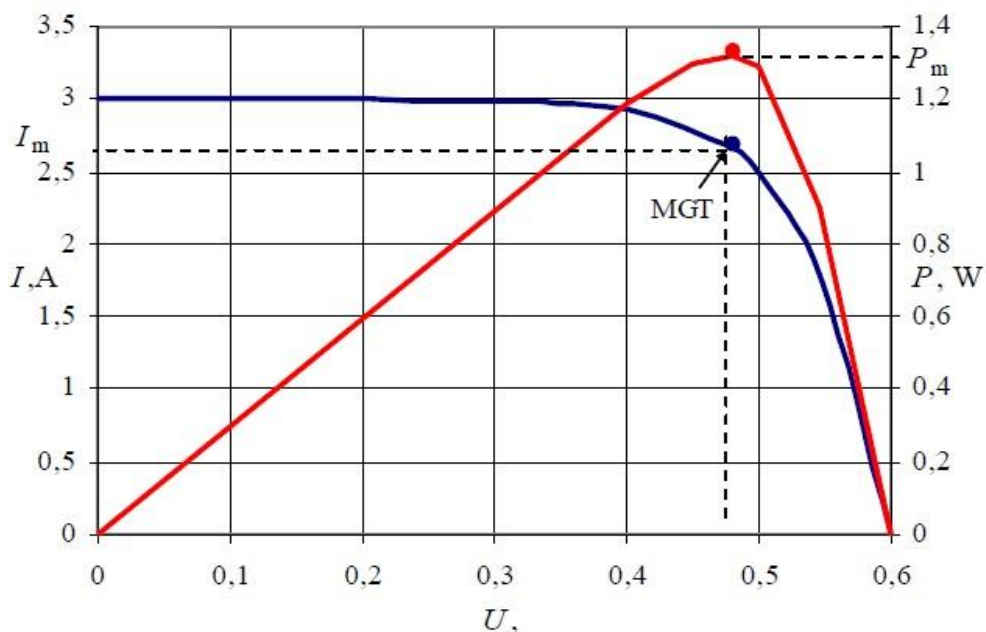
Fotoelektrinio elemento srovė nuo nulio iki MGT yra tiesiogiai proporcinga saulės apšvietai  $G$ . Tuščiosios veikos įtampa priklausomai nuo saulės energinės apšvietos kinta

nežymiai. Įtampa, didėjant srovei, sumažėja nežymiai. Įtampos dydis nepriklauso nuo fotoelektrinio elemento ploto, o didėja tiksliai srovė [7].



**1.3 pav.** Fotoelektrinio elemento srovės-įtampos charakteristikos: 1 –  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ; 2 –  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ; 3 –  $G = 200 \text{ W/m}^2$ ; MGT – maksimalios galios taškas [7]

Fotoelemento išvystomos galios kitimas pavaizduotas 1.4 paveiksle. MGT taške vidinė fotoelektrinio elemento varža susilygina su apkrovos varža. Fotoelektrinio elemento vidinė varža mažėja, didėjant saulės energinei apšvieta [7]i.



**1.4 pav.** Fotoelektrinio elemento srovės-įtampos ir galios charakteristikos: MGT – maksimalus galios taškas [7]

Taip pat fotoelektrinio elemento parametrai priklauso ir nuo jo temperatūros. Kai fotoelektrinio elemento temperatūra didėja, pradeda mažėti tuščiosios veikos įtampa ir nedaug padidėja trumpojo jungimo srovė. Dėl šios priežasties fotoelektrinio elemento išvystoma galia sumažėja. Standartinės elemento bandymo sąlygos yra:  $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ , atmosferos oro masei AM1,5 ir aplinkos temperatūrai  $\theta_{25} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Prie šių sąlygų yra nustatomi pagrindiniai modulio parametrai [7].

### 1.3. Saulės elektrinės

Dauguma saulės jėgainių yra sumontuotos ant nejudamų konstrukcijų, kur fotoelektriniai moduliai yra sumontuoti pagal nustatytą optimalų nuolydžio kampą [8]. Moduliai paprastai orientuojami į pietų pusę, su šiek tiek mažesniu posvyrio kampu nei esančios vietovės platumas. Kai kuriais atvejais, priklausomai nuo vietos klimato, reljefo arba elektros energijos kainų, gali būti naudojami įvairūs posvyrio kampai, todėl saulės elektrinė gali būti orientuota į „vakarinę ar rytinę“ elektros energijos gamybą [9].

Dėl šios priežasties saulės elektrinės yra montuojamos taip, kad jų posvyrio kampą būtų galima koreguoti du ar keturis kartus per metus, kad optimizuoti sezoninę elektros energijos gamybą [10]. Bet, šios saulės elektrinės turi ir minusų, joms yra reikalingi dideli užstatymo plotai kompensuojant šešėlių susidarymą žiemos sezono metu, o elektros energijos gamybos padidėjimas yra tik keli procentai, todėl šis sprendimas retai pateisina padidėjusias išlaidas ir šio projekto sudėtingumą [11].

Siekiant padidinti saulės tiesioginio spinduliavimo intensyvumą, saulės fotoelektriniai moduliai turi būti nukreipti statmenai saulės spinduliams [12]. Siekiant šio tikslo, fotoelektriniams moduliams yra naudojama dviejų ašių sekimo sistema, ši sistema gali sekti saulės orbitą danguje ir jos aukščio pokyčius per metus. [13]

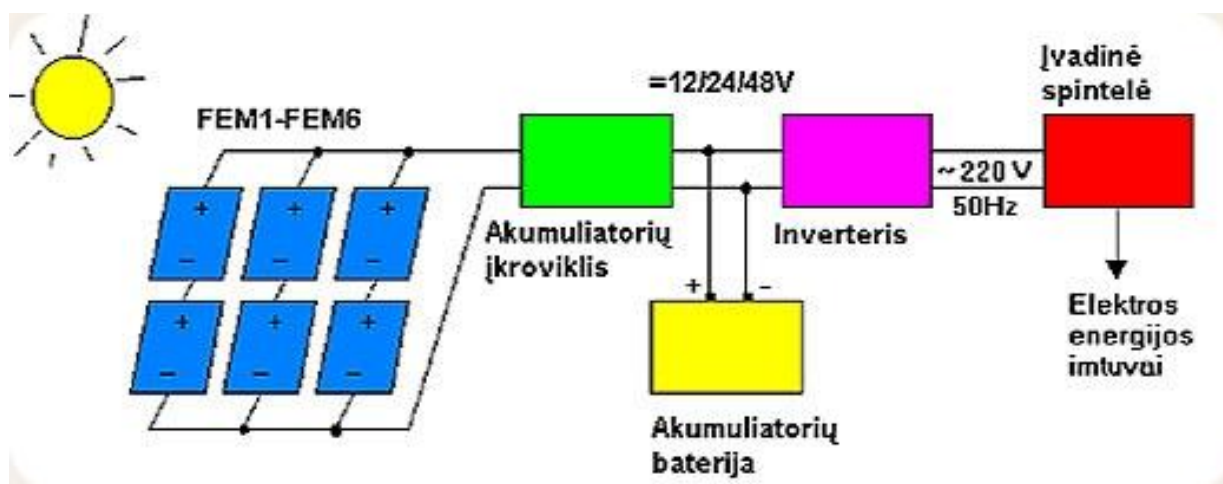
Šios saulės elektrinės turi būti pastatytos taip, kad būtų kuo mažesnis tarpusavio šešėliavimas saulei judant dangaus skliautu bei judant fotoelektriniams moduliams, todėl reikia daugiau žemės ploto [14]. Šios sistemos taip pat reikalauja daugiau sudėtingų mechanizmų išlaikant fotoelektrinių modulių paviršių reikiamu kampu. Elektros energijos gamybos apimčių padidėjimas gali siekti iki 30% [15] vietovėse, kuriose yra aukštas saulės spinduliavimo lygis, tačiau padidėjimas yra mažesnis vidutinio klimato ar tokių vietovių, kurių saulės apšviestumas yra mažesnis dėl klimato sąlygų (debesuotumo). Dėl šios priežasties, dviejų ašių sekimo sistemos dažniausiai naudojamos subtropiniuose regionuose [14] ir pirmą kartą šios sistemos buvo sumontuotos Lugo saulės jėgainėje [16].

Trečiasis metodas, norint pasiekti didesnę pagaminamos elektros energijos kiekį bei sumažinant užstatymo plotą ir investicijas, yra naudoti vienos ašies sekimo sistemą, t.y. sekti saulę pagal vieną aspektą - jos kasdienę kelionę per dangų [17]. Šios sistemos pasukamumo ašies kampas yra horizontalus, nors kai kurios jėgainės, pvz., Nellis oro pajėgų bazėje turi 20 ° posvyrio kampą [18]. Šiaurės-pietų orientacijos kryptimi tai yra veiksminga hibridinė sistema tarp saulės sekimo ir stacionarių saulės elektrinių [19].

Saulės elektrinės skirstomos į:

- veikiančias į elektros tinklą;
- autonomines;
- kilnojamas.

Autonominė saulės elektrinė (1.5 pav.) yra sudaryta iš fotoelektrinių modulių, elektros energijos akumuliacinio įrenginio, keitiklių, kurie iš nuolatinės srovės keičia į kintamą elektros srovę bei akumuliatorių įkrovimą ir iškrovimą valdančių įrenginių. Akumuliatoriuose yra sukaupta perteklinė elektros energija, kuri atsiranda šviesiu paros metu.



1.5 pav. Autonominės saulės elektrinės schema [20]

Akumuliatoriuose sukaupta elektros energija yra naudojama naktį arba esant nepakankamai saulės energinei apšvietai.

#### 1.4. Naujos medžiagos fotoelementų gamybai

Iškastinio kuro naudojimas yra labai didelė šių laikų problema, nes į aplinką yra išmetami didžiuliai kiekiai šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Vienas iš būdų sumažinti aplinkos taršą yra

panaudoti fotoelektrines medžiagas, kurios tiesiogiai saulės šviesos energiją verčia į elektros energiją.

Tačiau pasauliniu mastu saulės elektrinių gaminama elektros energija sudaro labai mažą elektros energijos dalį. Pagrindinė šios problemos priežastis yra didelė kristalinio silicio kaina, kuris yra pagrindinė fotoelektrinių modulių sudedamoji dalis [21].

Fotoelektriniam elementams yra reikalingas labai aukštos kokybės silicis. Ši puslaidininkinė medžiaga yra naudojama dėl konversijos efektyvumo. Tačiau didėjantis kristalinio silicio poreikis sukelia jo tiekimo trūkumus, todėl padidėja jo kaina. Kita didelės silicio kainos priežastis yra ta, kad jo gamybai ir fotoelektrinių elementų sumontavimui yra būtinos labai didelę švarą užtikrinančios patalpos. Todėl labai svarbu yra surasti pigią alternatyvą siliciui [21].

Šiuo metu mokslininkai, kurie tyrinėja medžiagas, bando įvairiais būdais sumažinti saulės elektrinių priklausomybę nuo silicio. Yra kuriami organiniai puslaidininkiai, kurie sudarytų galimybę pakeisti silicį saulės fotoelementuose. Tyrėjai bando naują gamybos būdą, t. y. spausdinamąją elektroniką. Pagal šią technologiją yra sukurtos puslaidininkinės molekulės polimerų pagrindu, kurios ištirpintos tirpiklyje, gali būti spausdinamos kaip rašalas. Todėl šiuo būdu ant lanksčių plėvelių atspausdintos grandinės yra pigesnės, nes nebereikia brangių patalpų, kurios turi būti laikomos itin švarios. Didžiausias šios technologijos privalumas yra toks, kad ji yra suderinama su pramonėje naudojamais spausdinimo būdais. Šiuo būdu pagaminti saulės elementai turi didelį pranašumą ten, kur yra būtinas lankstumas [21].

Kitai technologijų kartai priklauso saulės elementai, kurie veikia organinių molekulių pagrindu. Šia technologija domimasi todėl, nes jie yra mechaniškai lankstūs ir juos galima daug kur pritaikyti. Organiniai saulės elementai skiriasi tuo, kad juos galima naudoti uždarose erdvėse, kuriose nėra pakankamo apšviestumo. Tuo jie skiriasi nuo silicio pagrindu pagamintų įrenginių. Organiniai saulės elementai kol kas taikomi ribotai, nes jų natūralios šviesos konversijos efektyvumas yra ypač mažas [21].

Siekiant pritaikyti organines medžiagas saulės elementuose, plačiausiai yra tyrinėjamos medžiagos, pagamintos iš politiofeno. Jas tiriant pastebėta, jog šios medžiagos pasižymi dideliu krūvininkų pernešimu. Krūvininkų pernešimo laipsnis yra svarbus fotoelektrinių elementų veikimo parametras. Deja, remiantis moksliniais tyrimais, pastebėta, kad labai sudėtinga suderinti didelį konversijos efektyvumą bei krūvininkų pernešimą [21].

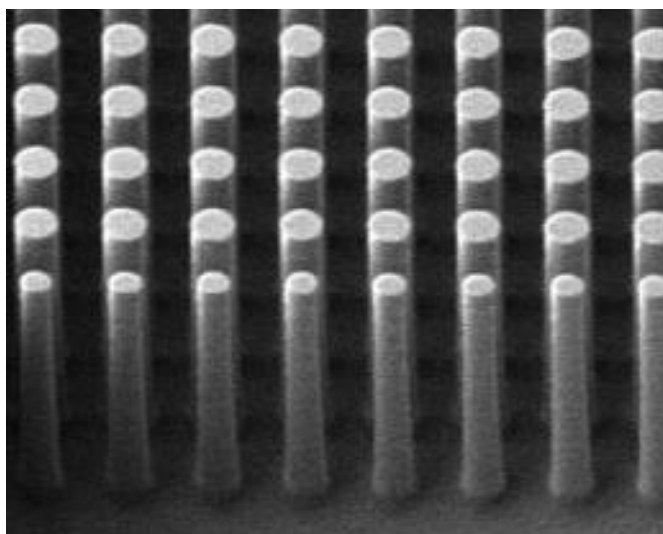
Kita mokslininkų grupė sujungė tiofeną su benzotiadiazoliu gaudami jungtinį polimerą (kopolimerą), kuris tapo tinkamas saulės šviesai sugerti. Šio polimero pagrindu pagamintas lauko tranzistorius pasižymi krūvininkų pernešimu, kuris yra sulyginamas su krūvininkų pernešimu prekyboje esančių polimerų pagrindu veikiančių lauko tranzistorių. Kurių naudingumo

koeficientas siekia apie 0,06 ir tai yra didžiausias su polimerinėmis medžiagomis pasiektas rezultatas. Taip pat norima naudingumo koeficientą padidinti iki 0,1. Pasiekus tokį efektyvumą atsirastų galimybė masiniam organinių fotoelektrinių elementų gamybai [21].

Mokslininkai atlieka tyrimus, kaip iki 1 metro pločio pagrindą padengti rašalo molekulėmis, išlaikant didelį tikslumą. Atsiradusi galimybė, organinėmis ar neorganinėmis molekulėmis padengti dideles sritis, atveria naujas pritaikymo galimybes didelių paviršiaus plotų elementams. Tačiau spausdinimų metu atsiranda visai kitos problemos lyginant su įprastinėms puslaidininkinių medžiagų technologijoms. Tačiau viliamasi, kad ši technologija atvers kelius į naują spausdinamosios elektronikos amžių [21].

Deja, organinėms medžiagoms nelemta visiškai pakeisti silicio saulės elementų gamyboje, nors joms ir numatoma didžiulė ateitis. Tačiau ieškoma būdų, kaip padidinti silicio efektyvumą [21].

Tradiciniai silicio pagrindu pagaminti saulės fotoelementai susideda iš dviejų skirtingo tipo silicio sluoksnių t.y. n-tipo (elektronai) ir p-tipo (skylės), kurios yra sujungtos į bendrą elektroninę p-n sandūrą. Kai šviesa pasiekia silicį ir išlaisvina elektrono ir skylės porą, netoli p-n sandūros yra sukuriama elektros srovė. Elektronų ir skylių porų skaičius, dalyvaujantis elektros energijos generavime toliau nuo p-n sandūros, yra nedidelis dėl šviesos atspindžio ir sugerties. Todėl mokslininkai, stengdamiesi pašalinti šią problemą, ant silicio paviršiaus sumontavo nanomatmenų silicio pagrindu pagamintus fotoelektrinius stulpelius (1.6 pav.). Nanostulpeliai sumažina šviesos atspindžius ir padidina sugertį ploname silicio sluoksnyje, o tai įtakoja krūvininkų generavimą arti p-n sandūros. Šis procesas sumažina ir pagaminimo sąnaudas, nes pakanka tik dviejų mikrometrų storio silicio sluoksnio, kai ankstesniuose modeliuose reikėdavo 300 mikrometrų storio sluoksnio [22].



**1.6 pav.** Silicio pagrindu pagaminti fotoelektriniai stulpeliai [22]

Su šia nauja nanostulpų technologija tyrėjai pasiekė didžiausią srovės tankį, lyginant su silicio pagrindu pagamintais saulės fotoelementais. Tolesnis žingsnis yra surasti būdą, kaip pagerinti šių fotoelementų veikimą [22].

Mokslininkai tikisi, kad netolimoje ateityje bus sukurti tokie fotoelektriniai elementai, kurie galėtų visiškai panaudoti saulės spindulinę energiją. Šį tikslą būtų galima įgyvendinti kuriant sudėtingas silicio sandūras su įvairiais jo lydiniais ir tyrinėjant struktūras su elektronų ir skylių porų kartotiniu generavimu [22].

### **1.5. Saulės energijos konversija į elektros energiją nenaudojant puslaidininkinių medžiagų**

Amerikos mokslininkai atrado šviesos magnetinį reiškinį, kuris gali pakeisti silicio pagrindu veikiančius saulės fotoelementus į naujos rūšies saulės spindulinę energiją konvertuojančius įrenginius [23].

Šviesa susideda iš magnetinės ir elektrinės dedamosios. Anksčiau buvo manoma, kad šviesos magnetinė dedamoji yra labai silpna, todėl ji būdavo atmetama kaip nereikšminga. Bet buvo atrasta, kad esant tam tikram intensyvumui, kai šviesa sklinda per nelaidžią medžiagą elektros srovei, šviesos laukas sukuria apie šimtą milijonų kartų stipresnį magnetinį reiškinį nei buvo manoma. Todėl esant šioms sąlygoms magnetinės dedamosios sukuriama efektas, pagal stiprumą yra lygus elektrinės dedamosios sukuriamiems reiškiniams [23].

Klasikiniuose saulės fotoelementuose šviesa patenka į medžiagą, ten yra sugerama ir sukuriamas nereikalinga šiluma. O pagal šį reiškinį, šviesos energija susikoncentruoja magnetiniame momente, todėl yra išvengiama dėl sugerties atsirandančių nuostolių. Šis atradimas leistų sukurti naujos rūšies be puslaidininkinių medžiagų veikiančius saulės fotoelementus. Esant intensyviai šviesai yra sukuriamas labai stiprus įmagnetinimas. Įmagnetinimas taptų talpinės galios šaltiniu [23].

Ši galimybė atsiranda anksčiau nepastebėtame optinio lyginimo reiškinyje. Įprastiniame optinio lyginimo reiškinyje šviesos elektrinis laukas stumia teigiamus ir neigiamus krūvininkus medžiagoje į skirtingas puses. Taip yra sukuria įtampą, kuri yra panaši į esančią baterijose. Šis efektas buvo stebėtas kristalinėse medžiagose, kuriose taip pat yra būdinga tam tikra simetrija [23].

Tyrėjai atrado, kad esant tam tikroms sąlygoms, šis optinio lyginimo reiškinys sukuriamas magnetinio šviesos lauko, atsiranda ir kitos rūšies medžiagose. Magnetinis šviesos laukas iškreipia elektronų judėjimą, kurie išsidėsto „C“ raidės forma. Šia trajektorija elektronai juda tik tam tikrą laiką. Šios „C“ formos elektringųjų dalelių judėjimas sukuria elektrinį ir

magnetinį dipolius. O juos sujungus į vieną eilę, atsirastų įtampa, o ją būtų galima panaudoti kaip energijos šaltinį [23].

Šviesa turi sklirti dielektrine medžiaga, pavyzdžiui, stiklu. Šviesos spindulys turi būti sufokusuotas taip, kad jo intensyvumas siektų dešimt milijonų vatų į kvadratinį centimetrą. Kadangi saulės šviesa tokio intensyvumo neišvysto, todėl mokslininkai tyrinėja naujas medžiagas, kurioms nereikėtų šitokių didelių šviesos intensyvumų [23].

Manoma, kad šis naujasis metodas leis sukurti pigesnius saulės fotoelementus. Yra apskaičiuota, kad su patobulintomis medžiagomis būtų galima pasiekti apie 10 % efektyvumą konvertuojant saulės šviesos energiją į elektros energiją. Tai maždaug atitiktų šiuo metu plačiai naudojamų saulės fotoelementų efektyvumą [23].

Norint sukurti šiuolaikinius saulės fotoelementus yra reikalingas intensyvus puslaidininkinių medžiagų apdirbimas. O šiuo atveju yra reikalingi lęšiai, kurie sufokusuotų šviesą. Stiklas yra gaminamas dideliais kiekiais ir nereikalingas ypatingas jo apdirbimas [23].

## **1.6. Naujas saulės elementų pagrindas**

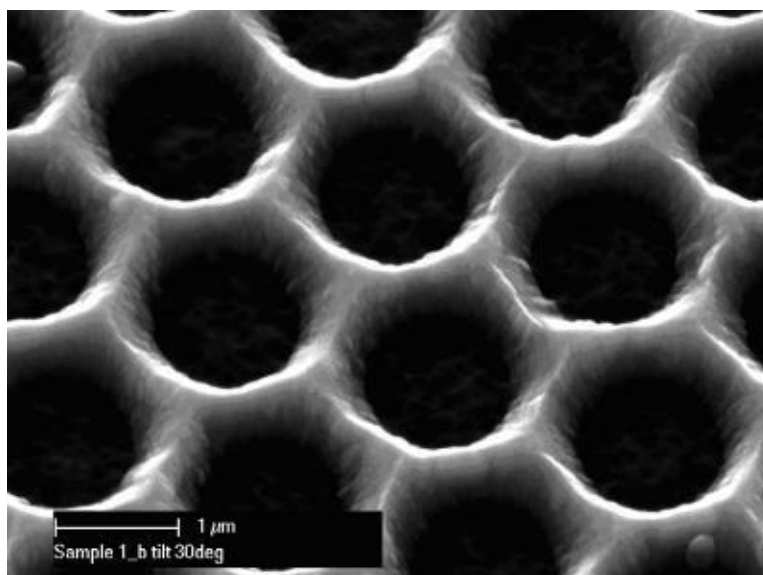
Čekijos tyrėjai, kartu su „Oerlikon Solar“ gamintojais iš Šveicarijos, sukūrė naują plonasluoksnių saulės fotoelementų struktūrą. Ši struktūra turėtų pasižymėti didesniu konversijos efektyvumu, be to, šiai struktūrai pagaminti yra sunaudojama daug mažiau silicio [24].

Siekiant atpiginti saulės fotoelementų gamybą, vienas iš galimų sprendimų būtų sudvejintųjų saulės fotoelementų gamyba iš mikrokristalinio bei amorfinio silicio, kurių atsiperkamumas yra vieneri metai. Tačiau šie fotoelementai turi trūkumą, jų plokštelės efektyvumas yra mažesnis už plačiai paplitusio silicio plokštelių efektyvumą [24].

Kad amorfinio ir mikrokristalinio silicio saulės fotoelementai būtų stabilesni, jie turi būti labai ploni, bet tada atsiranda kita problema, optinė sugertis tampa nebepakankama. Mokslininkų sukurta struktūra yra orientuojama į optiškai storus saulės fotoelementus, kurie pasižymi didele sugertimi, o atstumas tarp elektrodų yra paliekamas labai mažas [24].

Ši naujoji trimatė struktūra yra paremta išstobulinta sugėriklio nusodinimo technologija ir yra naudojama amorfinio silicio pagrindu pagamintai elektronikai, kuri yra naudojama skystųjų kristalų vaizduokliuose [24].

Šią nanomatmenų struktūrą sudaro nanostulpelių matrica, sudaryta iš cinko oksido (ZnO), kuri yra panaši į „šveicariško sūrio“ struktūrą. Ši struktūra susideda iš nanoskylių, kurios yra išsėdintos ant permatomo cinko oksido sluoksnio (1.7 pav.) [24].



**1.7 pav.** Skylėtas cinko oksido sluoksnis — pigesnių saulės elementų pagrindas [24]

Naujosios struktūros potencialas palygintas su šiuolaikiniais polikristaliniais saulės fotoelementais. Šios struktūros yra žymiai mažesnė kaina, o efektyvumas siekia apie 13 % . Tai gali rimtai pastūmėti šių fotoelementų pramoninę gamybą [24].

### **1.7. Plastikiniai fotoelementai**

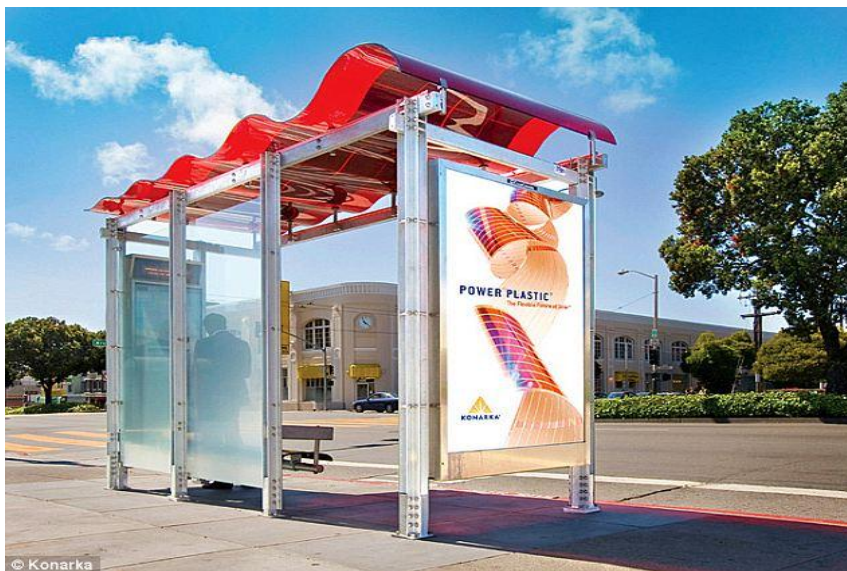
Plastikiniai saulės energijos fotoelementai (1.8 pav.) yra pigesni, lengvesni ir paprasčiau pritvirtinami už dabartinius saulės energijos elementus pagamintus iš silicio, kurie dominuoja rinkoje.

Plastikas yra ypač universali medžiaga ir šiuos naujus skydelius galima pritaikyti visur – pastatų sienoms, autobusų stotelių stogams ir kt. [25].



**1.8 pav.** Plastikinis saulės fotoelementas [25]

JAV įsikūrusi kompanija „Konarka“ jau pradėjo naująją technologiją diegti į tokius buitinius produktus kaip skėčiai ar lagaminai. Kompanija savo biuruose Floridos valstijoje iš šių plastikinių skydelių susimontavo užuolaidas. Kompanija planuoja plastikinius saulės fotoelementus pritaikyti gatvėse, pavyzdžiui, autobusų paviršiuose ir stotelių stoguose (1.9 pav) [25].



**1.9 pav.** Plastikiniai saulės energiją surenkantys skydeliai panaudoti autobusų stotelėje [25]

Plastikinių fotoelementų panaudojimo galimybės yra labai plačios. Standartinis plastikas yra dielektrikas, bet naujos technologijos, kurios leidžia sudaryti specialią molekulinę struktūrą, padaro plastiką laidų elektros srovei [25].

Gamintojai teigia, kad naujuosius plastikinius fotoelektrinius elementus vis dar reikia tobulinti, o jų konversijos efektyvumas yra tik 8 procentai, kai šiuolaikiniai silicio pagrindu pagaminti fotoelementai yra 10 procentų efektyvesni [25].

Šiuo metu dar nėra ištirtas šių plastikinių fotoelementų garantinis tarnavimo laikas bei suirimo laipsnis, kai tuo tarpu silicio pagrindu pagaminti fotoelementai tarnauja apie 20 metų [25].

## **1.8. Saulės energijos konversijos ir akumuliavimo įrenginiai**

Viena iš būtinausių autonominės saulės elektrinės sudedamųjų dalių yra akumuliatoriai. Šiuose elektros energijos kaupikliuose yra sukaupiama perteklinė šviesiu paros metu generuojama elektros energija, kuri vėliau yra panaudojama naktį bei esant nepakankamai saulės apšvietai.

Akumuliatorių baterijos talpumas yra paskaičiuojamas atskirai kiekvienam atvejui. Reikiamos talpos akumulatoriaus parinkimas yra autonominių saulės elektrinių vienas iš svarbiausių projektavimo parametrų. Jeigu akumuliatorių talpumas yra per didelis, fotoelektriniai moduliai pilnai neįkrauna akumuliatorių, o esant per mažai talpai, tada yra nesukaupiama visa perteklinė energija. Akumuliatorių baterijų talpa, apytiksliai vienam saulės elektrinės vatui yra apie 4,5 Ah [20].

Šiuo metu yra didžiulė įvairiausių akumuliatorių tipų pasiūla. Autonominėms saulės elektrinėms skirti akumuliatoriai yra brangūs, o vietoj šių specialių akumuliatorių naudojant tam nepritaikytus akumuliatorius dažniau reikia keisti naujais, taip pat yra sudėtingesnis jų eksploatavimas [20].

Geriausias pasirinkimas būtų naudoti specialius saulės elektrinėms skirtus gilaus iškrovimo akumuliatorius. SAFT Sunika kompanijos gaminami nikelio-kadmio (Ni-Cd) akumuliatoriai atlaiko apie 3500 įkrovos ir iškrovos ciklą, o jų garantinis tarnavimo laikas yra apie 20 metų, šio tipo akumuliatoriai nereikalauja daug priežiūros, bet yra ganėtinai brangūs (~ 700 JAV \$ - 180Ah , 12V). Dažniausiai yra naudojami rūgštiniai gilaus iškrovimo akumuliatoriai, kurie atlaiko apie 250 - 700 įkrovimo ir iškrovimo ciklą, o tarnavimo laikas yra nuo 3 iki 7 metų. Šie akumuliatoriai nuo standartinių automobilinių akumuliatorių skiriasi [20]:

- kiekviena plokštelė yra storesnė nei 2 mm;
- separatorius yra pagamintas iš mikroporinio polietileno;
- elektrolito kiekis viršija 1,15 l vienam elementui;
- elektrolito tankis neviršija 1,25 g/cm<sup>3</sup>.

Šių akumuliatorių kaina yra (~ 400 JAV \$ - 350Ah , 12V), bet Lietuvoje tokia kaina vis dar yra per aukšta. O nesant šių akumuliatorių paklausos, jais Lietuvoje niekas neprekiauja. Norint juos galima užsakyti užsienyje, bet pristatymas yra ganėtinai brangus [20].

Prieinamiausi yra standartiniai automobiliniai rūgštiniai akumuliatoriai. Palyginus, šių akumuliatorių vienos Ah kaina yra apie 4 – 5 kartus mažesnė, nei specialių saulės elektrinėms skirtų akumuliatorių. Automobilinių akumuliatorių pagrindinis trūkumas yra tas, kad jų garantinis tarnavimo laikas yra labai mažas. Šių akumuliatorių plokštelės yra plonos ir turi didelį paviršiaus plotą, skirtą greitam iškrovimui su didele srove. O autonominėje saulės elektrinėje iškrova vyksta ilgą laiką ir maža srove [20].

Fotoelektriniai moduliai generuoja nuolatinę srovę, todėl kintamos srovės imtuvams yra reikalingas keitiklis, kuris nuolatinę elektros srovę keičia į kintamąją elektros srovę. Keitilių išėjimo įtampų formos yra skirtingos, jos skirstomos [20]:

- stačiakampės laiptuotos išėjimo įtampos (dažniausiai 4 laipteliai į periodą);
- modifikuoto sinuso keitikliai, jų išėjimo įtampos sudarytos iš didelio laiptelių;
- skaičiaus (apie 50 laiptelių į periodą);
- sinusinės išėjimo įtampos keitikliai.

Pirmosios grupės keitikliai tinka apie 90 % visų elektros energijos imtuvų maitinimui. Antrosios ir trečiosios grupės keitikliai tinka galima sakyti visiems elektros energijos imtuvams [20].

Viena iš svarbiausių keitiklių charakteristikų yra jo naudingumo koeficientas  $\eta$ . Standartinių keitiklių naudingumo koeficientas  $\eta = 90\%$  yra pasiekiamas esant didelei apkrovai, o esant mažai apkrovai, naudingumo koeficientas dažniausiai siekia tik iki 50 %. Aukštos klasės STUDER Si 3548(TP) 3500W keitiklio naudingumo koeficientas  $\eta = 95\%$ , o tuščiosios eigos galia  $\leq 0,8$  W visame galios diapazone nuo 0,3 W iki 3,5 kW, o išėjimo įtampa yra  $230\text{ V} \pm 3\%$ ,  $50\text{ Hz} \pm 0,01\%$  [20].

### **1.9. Saulės elektrinių diegimo ekonominiai rodikliai**

Lietuvoje fotoelektros supirkimo tarifai yra tokie: gaminantiems iki 10 kW- 0,54 Lt už kWh, nuo 10 iki 100 kW – 0,49 Lt už kWh, nuo 100 kW iki 350 kW – 0,46 Lt už kWh, virš 350 kW – 0,46 Lt už kWh. [26]. Standartinis individualus gyvenamasis namas per mėnesį suvartoja apie 500 kWh elektros energijos. Tokiam namui visiškai pakaktų 5 kW galingumo saulės elektrinės, o investicijos siektų apie 50 tūkst. Lt. Atiduodant pagamintą elektros energiją į elektros tinklus, galima gauti apie 2,7 tūkst. Lt pajamų per vienerius metus [20].

### **1.10. Klimato sąlygų įtaka saulės elektrinių naudojimui**

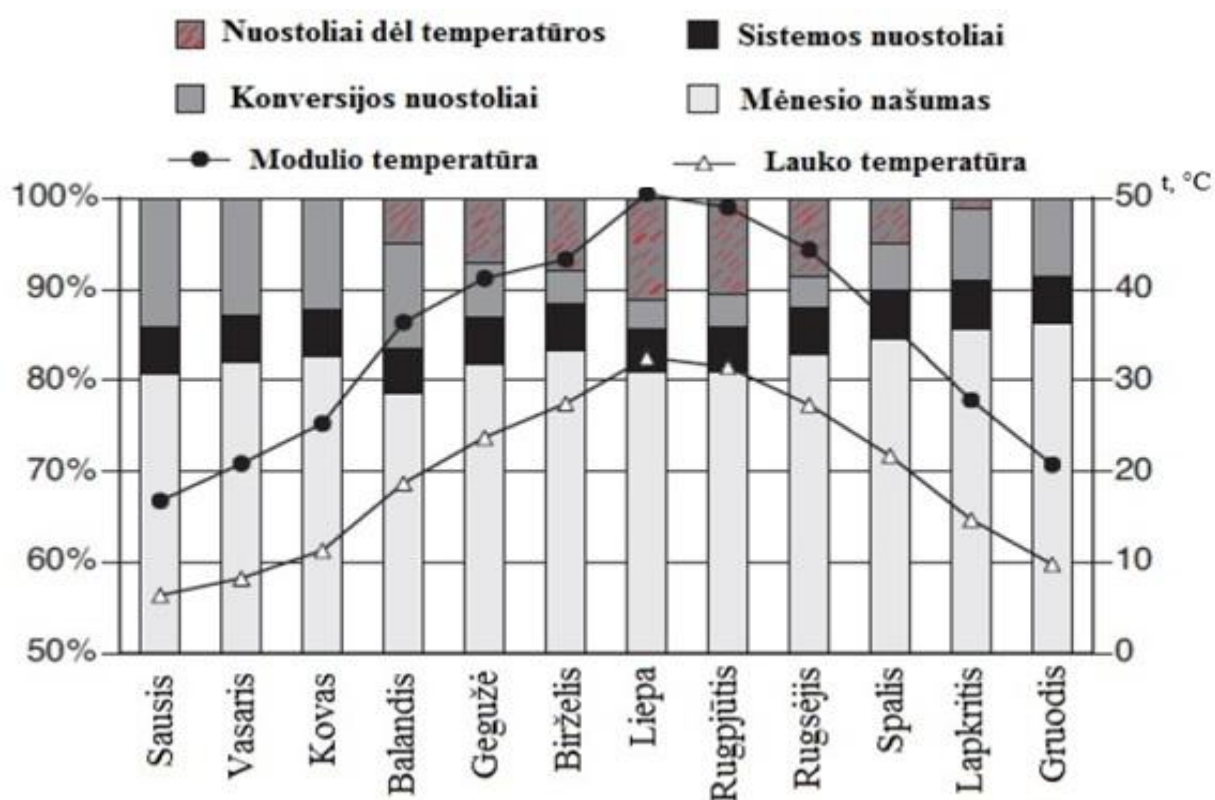
Šiuo metu su energetika susiję aspektai yra labai svarbūs. Jie apima racionalų neatsinaujinančių išteklių vartojimą, teršalų išmetimo į aplinką mažinimą ir poveikį aplinkai. Dėl šių priežasčių vis labiau visame pasaulyje susidomėjimą kelia aplinką tausojančios energijos gamyba ir jos taupymas. Iš visų technologijų, kurios galėtų tai atlikti, yra saulės šviesos elektrinės, vėjo generatoriai bei biomasė. Fotoelektrinės sistemos gali būti laikomos vienu iš labiausiai paplitusių sprendimų, susijusių su užtikrintu energijos generavimu ir nedideliu poveikiu aplinkai [27].

Saulės elektrinės efektyviam veikimui labiausiai įtaką daro įvairūs gamtos reiškiniai. Yra labai didelis skirtumas tarp saulės elektrinių eksploatavimo sąlygų pasaulyje. Šį skirtumą

įtakojantys veiksniai yra klimato juostos bei geografinė platuma. Saulės apšviestumo lygis pasaulyje yra labai netolygus. Vidutiniškai žemės paviršių pasiekia 210 – 250 W/m<sup>2</sup> subtropiniuose regionuose, 130 - 210 W/m<sup>2</sup> vidutinėje platumoje ir 80–130 W/m<sup>2</sup> šiaurės platumoje [27].

Dėl šių esančių skirtumų yra atliekami tyrimai, kuriais remiantis yra nustatomas vietovės tinkamumas saulės elektrinėms. Išanalizavus saulės elektrinės tinkamumo atliktą tyrimą Omano valstybėje pastebėta, kad čia yra didelis saulės energijos potencialas, bet saulės elektrinės efektyvumui šioje vietovėje labai didelę įtaką daro temperatūra ir dulkėtumas. Šio tyrimo rezultatai atskleidė, kad tik 9 % šios valstybės teritorijos yra tinkama saulės elektrinių statybai [28].

Esant aukštai temperatūrai, saulės elektrinės efektyvumas gali sumažėti nuo 3,6 % iki 11% [29]. Saulės elektrinės generuojamos energijos ir nuostolių pasiskirstymas pavaizduotas (1.10 pav.). Didžiausi nuostoliai dėl temperatūros būdingi šiltajam metų periodui.

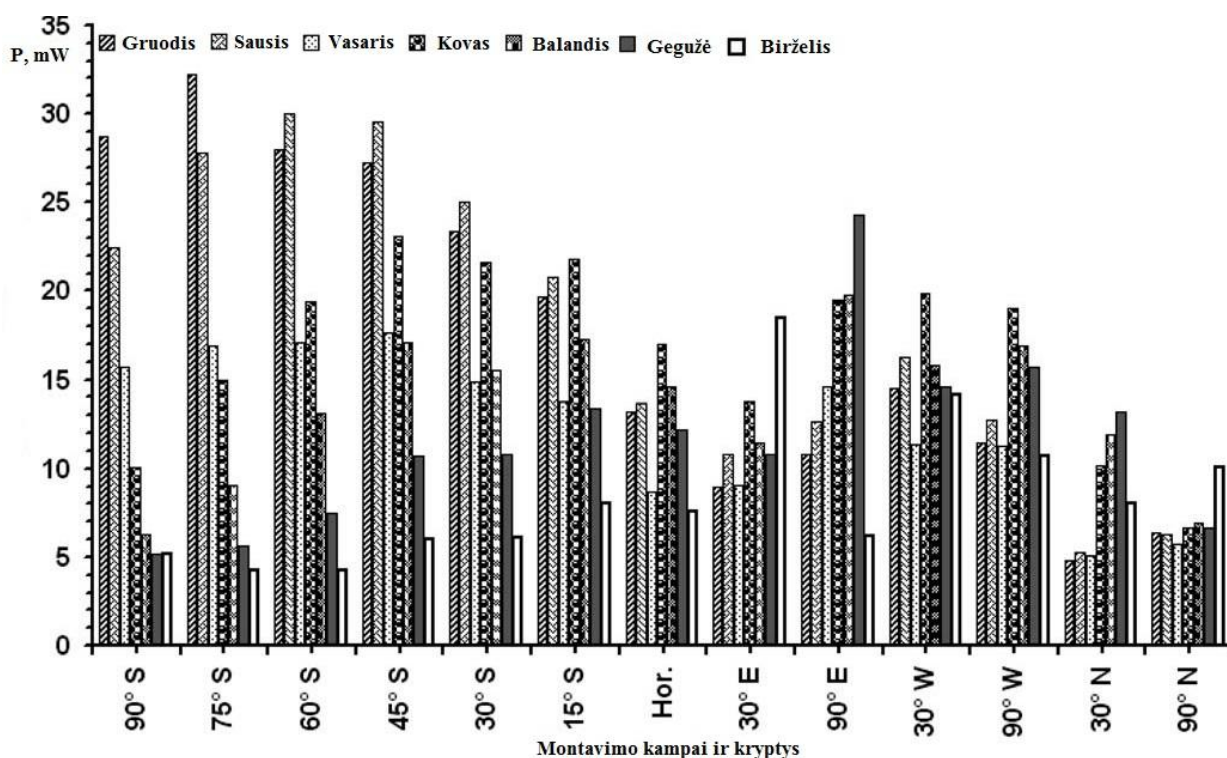


1.10 pav. Saulės elektrinės generuojamos energijos ir nuostolių pasiskirstymas [29]

Dulkėtumo įtaka saulės elektrinės efektyvumui buvo tyrinėjama Kuraimato (Kuraimat) mieste, esančiame apie 90 km į pietus nuo Kairo (Cairo) miesto. Šioje vietoje yra dideli

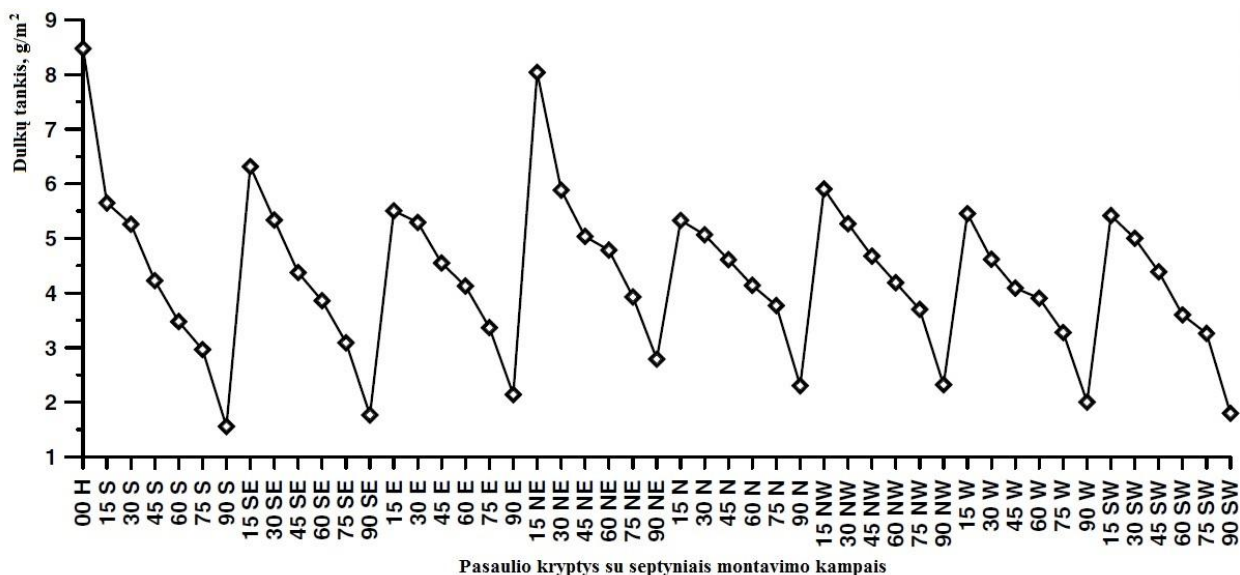
pramonės rajonai, todėl ore sklindo įvairios kietosios dalelės ir būna smėlio audrų. Todėl nešvarumų kaupimasis ant saulės elektrinių fotoelektrinių modulių yra labai didelė problema.

Tyrėjų atliktame tyrime buvo nustatyta dulkių įtaka saulės elektrinės generuojamai galiai. Kad būtų galima palyginti dulkių nusėdimą ant fotoelektrinių modulių skirtingais posvyrio kampais, buvo atlikti tyrimai su 100 stiklinių plokštelių. Plokštelės buvo sumontuotos skirtingais posvyrio kampais ( $\beta$ ) ir azimuto kampais ( $\gamma$ ). Šių stiklinių plokštelių šviesos pralaidumas buvo matuojamas 7 mėnesius vienodais laiko intervalais ir po kiekvienos smėlio audros (1.11 pav.) [30].



1.11 pav. Krypties ir posvyrio kampo įtaka fotoelektrinių modulių generuojamai galiai per 7 mėnesius [30]

Iš šių rezultatų galime spręsti, kad yra priklausomybė tarp fotoelektrinių modulių generuojamos galios bei dulkių tankio ant jų, modulių sumontavimo kampo bei orientacijos (1.12 pav.).



**1.12 pav.** Dulkių nusėdimo tankis, esant 8 skirtingoms orientacijoms ir 7 skirtingiems posvyrio kampams ant stiklo plokštelių [30]

Šiomis sąlygomis susidaręs dulkių kiekis svyruoja nuo 8,6 g/m<sup>2</sup> (stiklo plokštelė sumontuota 0° kampu) iki 2,56 g/m<sup>2</sup> (stiklo plokštelė sumontuota 90° kampu, o orientacija 135° nuo šiaurės). Taip pat šviesos pralaidumas sumažėja nuo 52,62 iki 12,42 % [30].

### 1.11. Apibendrinamosios išvados

Saulės elektrinės gali būti naudojamos efektyviam ir nenutrūkstamam elektros energijos tiekimui.

Saulės elektrinių pagamintos kWh kaina yra didelė, nes didžiausią įtaką jos kainai turi žaliavos, t.y. silicio plokštelių, kurios gaunamos supjausčius silicio kristalus, gamybos kaina, kadangi žaliavos kainą sudaro iki 70 % saulės energijos kainos [6].

Labai didelę įtaką saulės šviesos elektrinės efektyvumui turi temperatūra. Tyrimų duomenimis, dėl aukštos temperatūros įtakos gali susidaryti nuo 3,6 % iki 11% pagaminamos energijos nuostolių [29].

Autonominės saulės elektrinės gali visiškai patenkinti elektros energijos poreikius ištisus metus nutolusiems nuo elektros tinklų gyvenvietėms ar sodyboms.

## **2. TYRIMŲ TIKSLAS IR UŽDAVINIAI**

Šio darbo tikslas yra ištirti individualaus namo elektros energijos dinamiką ir nustatyti energijos poreikių tenkinimo galimybes naudojant saulės energijos konversijos sistemą.

Uždaviniai:

1. Nustatyti autonominės saulės elektrinės generuojamą galią;
2. Nustatyti saulės elektrinės pagaminamos elektros energijos kiekį;
3. Ištirti individualaus namo elektros energijos poreikius ir jų kitimą;
4. Nustatyti autonominės saulės elektrinės išnaudojimo koeficientą;
5. Ištirti autonominės saulės elektrinės akumuliatorių baterijų įkrovos ir iškrovos dinamiką.

### 3. TYRIMŲ METODIKA

#### 3.1. Tyrimų objektas

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti 2011 – 2013 metais autonominėje saulės elektrinėje (3.1 pav.), įrengtoje Virbališkių km. Kauno rajone. Elektrinę sudaro 240 vnt. dvigubos sandūros amorfinio silicio (a-Si) fotoelektrinių modulių GS-50S, kurių bendra galia yra 12 kW<sub>p</sub>, akumuliatorių baterijų CELLYTE 2ETG 2000 – 16 OPzV 2000 (30 vnt.), kurių suminė talpa yra 60000 Ah, inverterio Sunny Island 5048 valdančio akumuliatorių užkrovimą ir iškrovimą ir inverterio Sunny Boy 3800 tiesiogiai verčiančia saulės elektrinės nuolatinę srovę į kintamą.



**3.1 pav.** 12 kW<sub>p</sub> Saulės elektrinė

Fotoelektriniai moduliai yra įrengti žemės paviršiuje ant metalinių konstrukcijų. Akumuliatorių baterijos ir inverteriai yra įrengti pastato rūsyje. Saulės elektrinė turi saulės energinės apšvietos, elektros energijos matavimo, fotoelektrinių modulių bei aplinkos temperatūrų, vėjo greičio, duomenų kaupimo sistemas bei internetinę prieigą.





**3.3 pav.** Tiesioginės saulės energinės apšvietos matavimo prietaisas „Sunny SensorBox“

3.3 paveiksle pavaizduotas tiesioginės saulės energinės apšvietos prietaisas. Šio prietaiso matuojamas didžiausias energinis apšviestumas yra  $1500 \text{ W/m}^2$ , matavimai atliekami kas  $1 \text{ W/m}^2$  su 8% paklaida [32].

### 3.3. Saulės jėgainės tyrimų metodika

Saulės elektrinės elektros energijos gamybos potencialas gali būti išreiškiamas lygtimi [33]:

$$E_p = G_a A_m \eta_{el} \tau_{el} \quad (2)$$

čia  $G_a$  – vidutinė valandos saulės energinė apšvieta,  $\text{kWh/m}^2\text{h}$ ;

$A_m$  – saulės elektrinės modulių aktyvusis plotas,  $\text{m}^2$ ;

$\eta_{el}$  – saulės elektrinės modulių energinės konversijos efektyvumas ( $\eta_{el} - 0,15$ );

$\tau_{el}$  – saulės elektrinės efektyvusis darbo laikas, h.

Autonominės saulės elektrinės efektyvumas yra apibūdinamas elektrinės išnaudojimo koeficientu  $\eta$ , t. y. santykiu tarp elektros energijos sąnaudų ir saulės elektrinės energijos gamybos potencialo [33]:

$$\eta = \frac{E_s}{E_p}, \quad (3)$$

čia  $E_s$  – metinės elektros energijos sąnaudos, kWh;

$E_p$  – saulės elektrinės metinis elektros energijos gamybos potencialas.

Tiriamajame objekte elektros energija naudojama gyvenamojo namo ir pagalbinių pastatų bei lauko apšvietimo poreikiams. Metinės energijos sąnaudas galima nustatyti pagal lygtį [34]:

$$E_s = \sum_1^i P_i \tau_i, \quad (4)$$

čia  $P_i$  – i-tojo imtuvo galia, kW,

$\tau_i$  – i-tojo imtuvo metinis darbo laikas, h.

Elektros energija apskaitoma į matavimo sistemą integruotu energijos skaitikliu, o duomenys kaupiami duomenų kaupiklyje ir internetinėje duomenų bazėje.

### 3.4. Autonominės saulės elektrinės akumuliatorių baterijų tyrimo metodika

Akumuliatorių baterijų įkrovos lygis yra pagrindinis parametras, įvertinantis akumuliatorių pajėgumą. Kadangi šis parametras atspindi akumulatoriaus veikimą, todėl tiksliai apskaičiuotas gali užkirsti kelią giliam akumuliatorių iškrovimui ir pagerinti akumulatoriaus veikimą bei tarnavimo laiką. Tai leidžia priimti racionalius valdymo sprendimus bei sutaupyti elektros energijos. Kadangi akumuliatorių baterija yra cheminis energijos kaupiklis, todėl tiesiogiai išmatuoti sukauptą energiją yra neimanoma. Todėl šis parametras yra apskaičiuojamas Kulono metodu [35].

$$\theta = \theta_0 - \frac{1}{T_N} \int_{t_0}^t \delta_I I_i \Delta t \quad (5)$$

čia  $\theta_0$  – pradinis akumuliatorių įkrovos lygis, %,

$T_N$  – nominali akumulatoriaus talpa, Ah,

$\delta_I$  – srovės nuostolių koeficientas (0,98 – 1),

$I_i$  – akumulatoriaus įkrovos srovė, A,

$\Delta t$  – matavimo laikas, h.

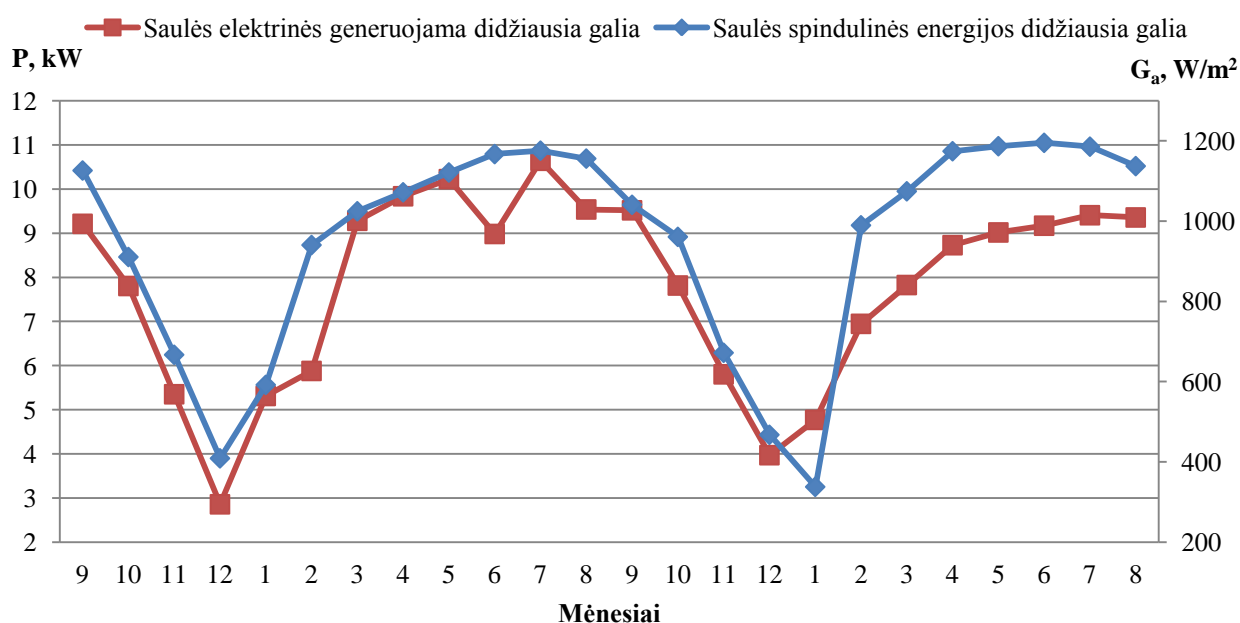
Šis Kulono skaičiavimo motodas (Ampervalandžių balanso) yra patogus ir lengvai įgyvendinamas. Tačiau yra keletas niuansų, kurie daro įtaką matavimui: srovės nuostoliai, kurie atsiranda elektros kabeliuose įkraunant ir iškraunant akumulatorius bei srovės matavimo tikslumas, kuriam įtaką daro srovės matavimo jutiklio paklaida [35].

## 4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APITARIMAS

### 4.1. Autonominės saulės šviesos elektrinės generuojamos galios dinamika

Tyrimai atlikti autonominėje saulės elektrinėje, kurios generuojamą elektros energiją vartoja tik individualus gyvenamasis namas. Duomenys surinkti nuo 2011 m. rugsėjo – 2013 m. rugpjūčio.

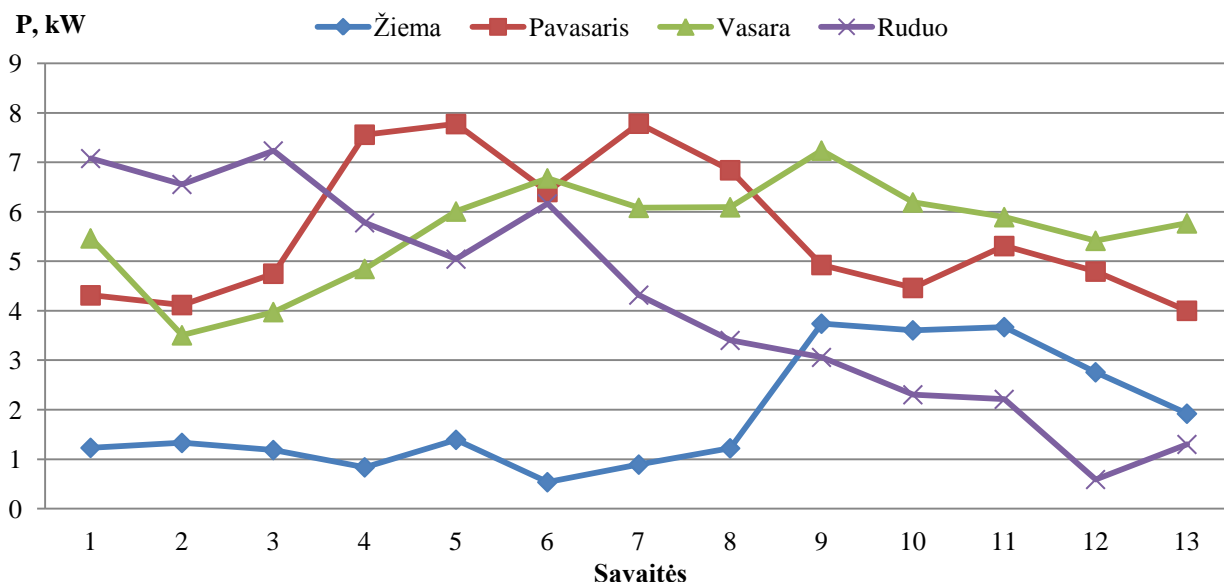
Saulės šviesos elektrinės didžiausios generuojamos galios bei didžiausios saulės spindulinės energijos pasiskirstymas per dvejus metus pavaizduotas 4.1 pav.



**4.1 pav.** Didžiausia autonominės saulės elektrinės generuojama galia ir didžiausia saulės spindulinės energijos galia per dvejus metus.

Didžiausia autonominės saulės elektrinės generuojama galia yra vasaros mėnesiais. 2012 m. liepos mėnesį siekė 10,6 kW, o 2013 liepos mėnesį siekė 9,4 kW. Saulės spindulinės energijos didžiausia galia 2012 m. liepos mėnesį siekė 1176 W/ m<sup>2</sup>, o 2013 m. birželio mėnesį 1195 W/m<sup>2</sup>.

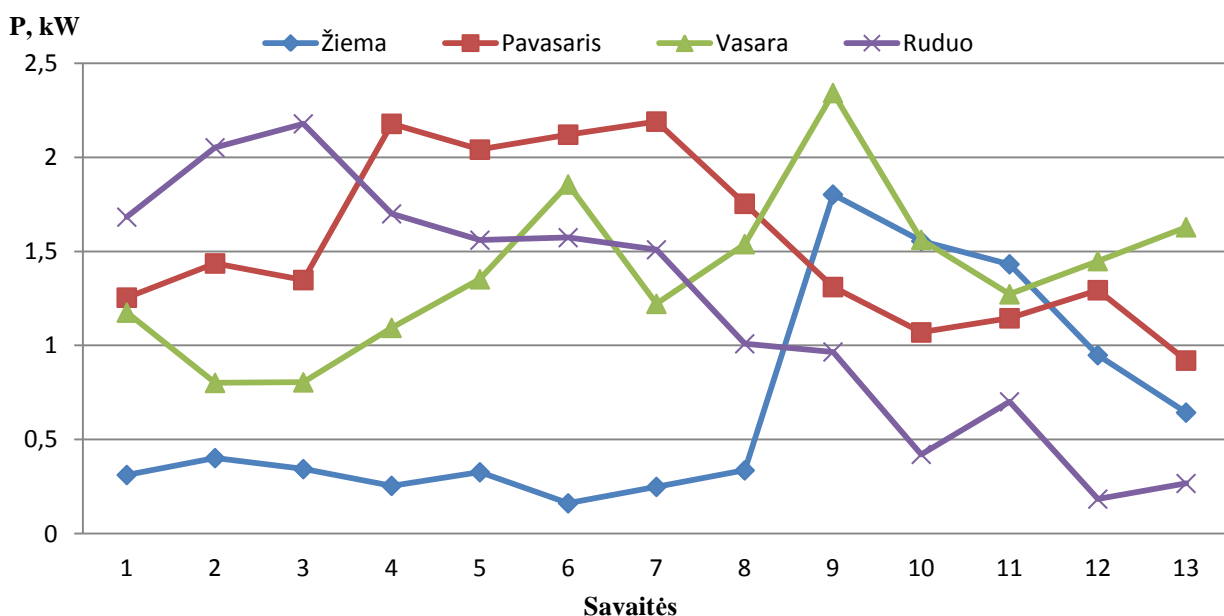
Didžiausios saulės elektrinės generuojamos galios pokytis per 2012 metus savaitės laiko atžvilgiu keturiais metų laikais pavaizduotas 4.2 paveiksle.



4.2 pav. Didžiausia autonominės saulės elektrinės generuojama galia per savaitę.

Saulės elektrinės generuojamos didžiausios galios pokytis įvyksta žiemos bei rudens pabaigoje. Nuo gruodžio mėnesio iki vasario mėnesio saulės elektrinės generuojama galia padidėja apie 250 %, vidutiniškai nuo 1 kW iki 2,5 kW. O rudens laikotarpiu atvirkščiai, generuojama galia sumažėja nuo 6,3 kW rugsėjo mėnesį iki 2,4 kW lapkričio mėnesį, o tai sudaro 260 %. Pavasario bei vasaros metu, saulės elektrinės generuojama galios pokytis yra nežymus ir siekia tik apie 1 %.

Autonominės saulės elektrinės vidutinės generuojamos galios pokytis per 2012 metus savaitės laiko atžvilgiu pavaizduotas 4.3 paveiksle.

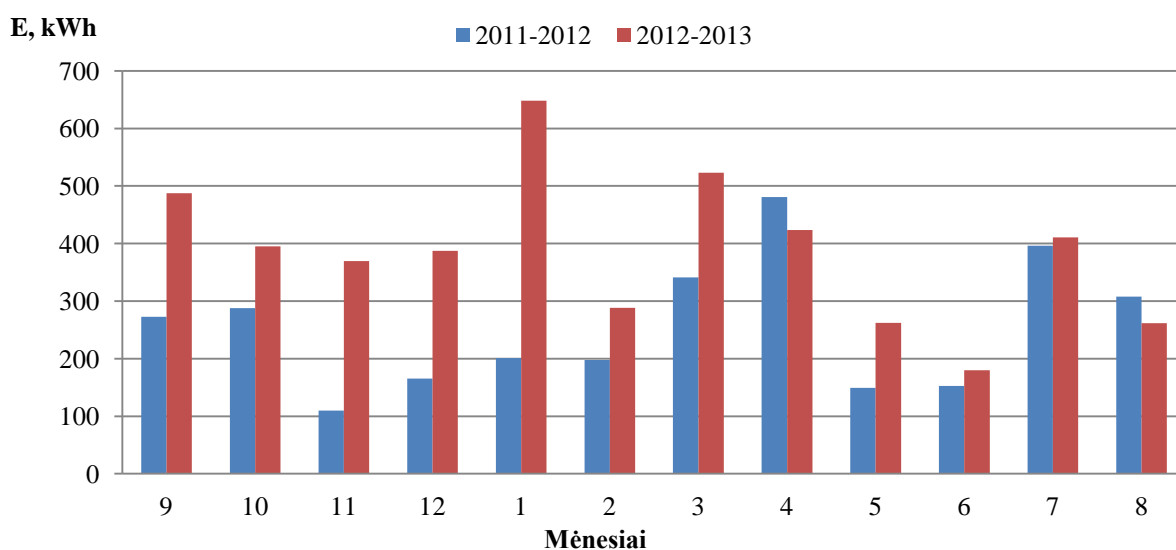


4.3 pav. Vidutinė autonominės saulės elektrinės generuojama galia per savaitę.

Vidutinis generuojamos galios pokytis per dvejus žiemos mėnesius kito nežymiai, apie 4 %, bet prasidėjus trečiam žiemos mėnesiui vidutinė saulės elektrinės generuojama galia padidėja nuo 0,3 kW iki 1,8 kW. Didžiausia generuojama vidutinė galia yra pasiekama pavasarį bei vasarą, atitinkama 2,2 kW bei 2,4 kW. Šiame paveiksle matome, kad didžiausias generuojamos galios pokytis įvyksta vėlyvą žiemą ir rudenį.

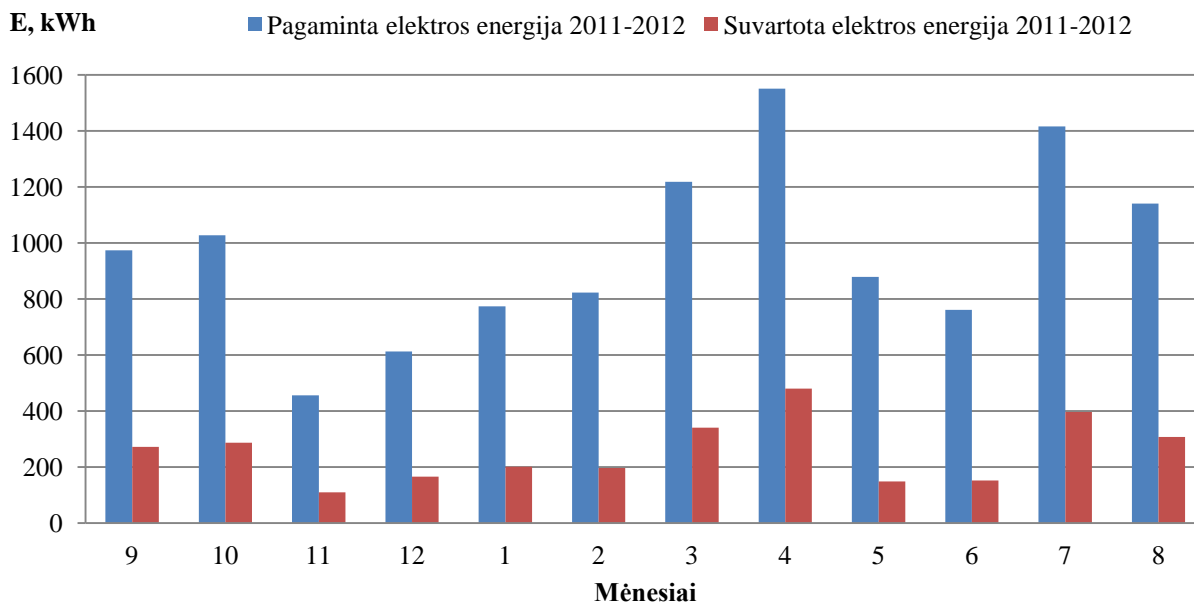
#### 4.2. Individualaus namo elektros energijos poreikių tenkinimas naudojant saulės elektrinę

Dviejų metų individualaus gyvenamojo namo elektros energijos suvartojimas pateiktas 4.4 pav. Elektros energijos sąnaudos nustatytos vadovaujantis elektros srovės keitiklio Sunny Boy 3800 užfiksuotais duomenimis. Atlikus tyrimą (2011 rugsėjo – 2013 rugpjūčio mėnesiais) nustatyta, kad per metus vidutiniškai yra suvartojama apie 3850 kWh elektros energijos.



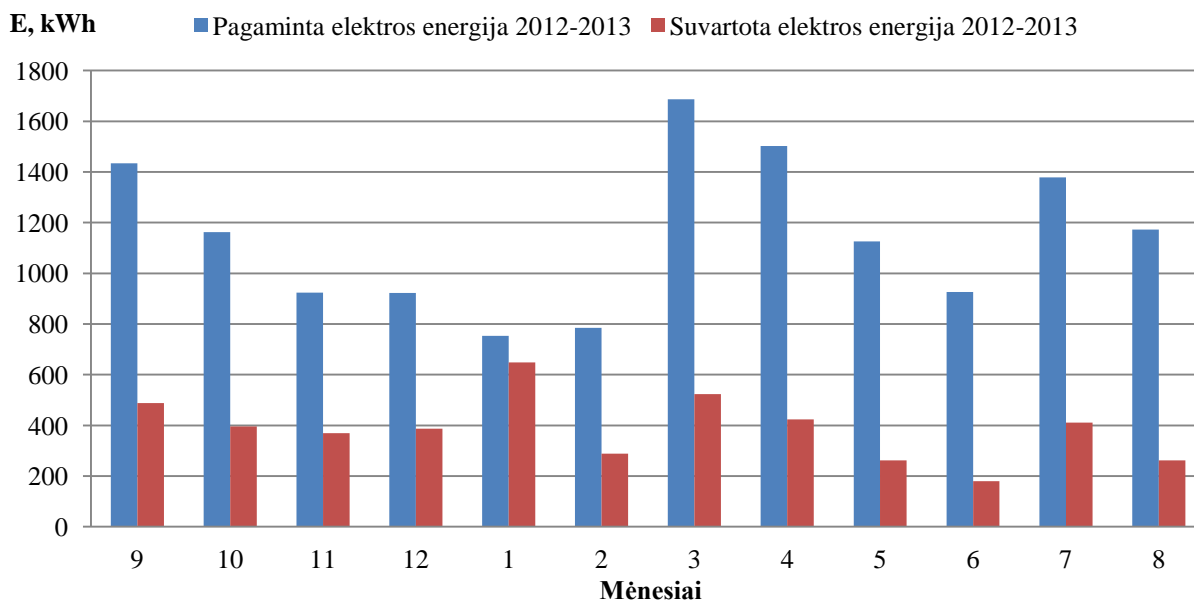
4.4 pav. Per metus suvartota elektros energija.

Tyrimo metu nustatyta, kad individualus gyvenamasis namas per mėnesį vidutiniškai suvartoja apie 321 kWh elektros energijos. 4.4 pav. Matome, kad mažiausiai elektros energijos buvo suvartota 2011 metų lapkričio mėnesį – 110 kWh, o daugiausiai elektros energijos suvartota 2013 metų sausio mėnesį – 648 kWh. Individualaus gyvenamojo namo elektros energijos poreikių tenkinimas pavaizduotas 4.5 pav. ir 4.6 pav.



**4.5 pav.** Individualaus gyvenamojo namo elektros energijos poreikių tenkinimas 2011 – 2012 metais.

Kaip matome 4.5 paveiksle, kad individualaus gyvenamojo elektros energijos poreikiai yra visiškai tenkinami nuo 2011 m. rugsėjo iki 2012 m. rugpjūčio. Autonominės saulės elektrinė pagaminta elektros energija šiam laikotarpiui yra lygi 11635 kWh elektros energijos. Namu elektros energijos poreikiai per metus yra 3062 kWh. Šiuo laikotarpiu susidaro 8573 kWh pagamintos elektros energijos perteklius. Tai sudaro apie 278 % visos individualaus gyvenamojo namo suvartojamos elektros energijos nuo 2011 m. rugsėjo iki 2012 m. rugpjūčio.

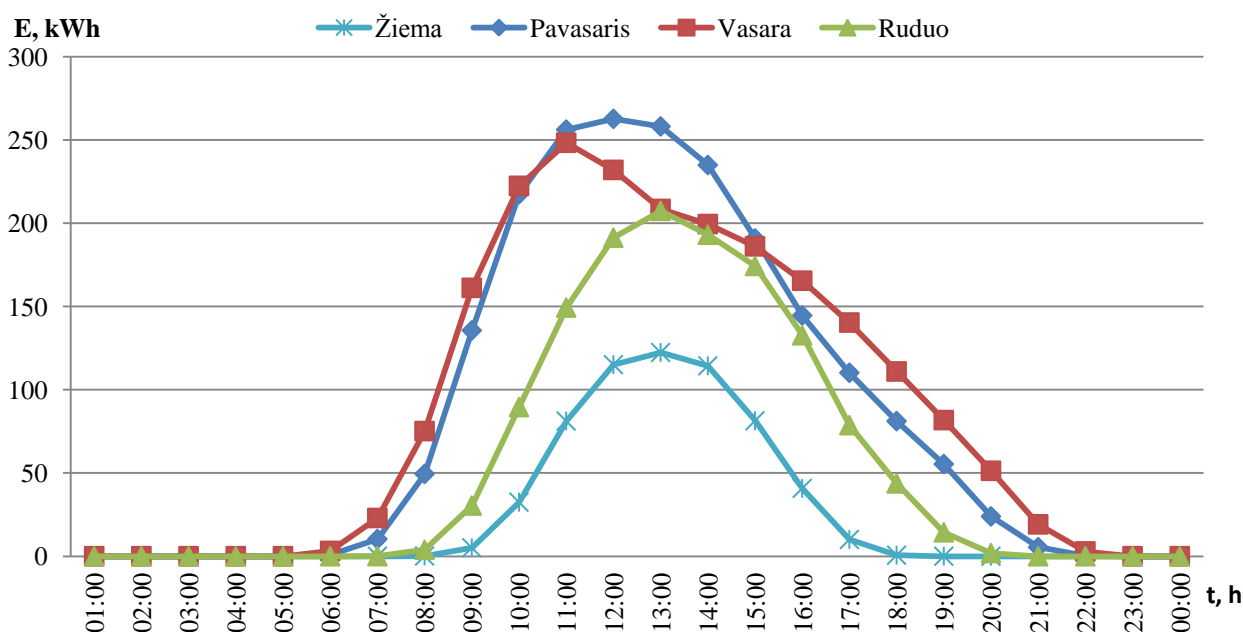


**4.6 pav.** Individualaus gyvenamojo namo elektros energijos poreikių tenkinimas 2012 – 2013 metais.

Individualaus gyvenamojo elektros energijos poreikiai (4.6 pav.) yra visiškai tenkinami nuo 2012 m. rugsėjo iki 2013 m. rugpjūčio. Autonominės saulės elektrinės pagaminta elektros energija šiam laikotarpiui yra – 13772 kWh elektros energijos. Namo elektros energijos poreikiai yra 4637 kWh elektros energijos. Šiuo laikotarpiu susidaro 9135 kWh pagamintos elektros energijos perteklius. Tai sudaro apie 197 % visos individualaus gyvenamojo namo suvartojamos energijos nuo 2012 m. rugsėjo iki 2013 m. rugpjūčio.

Saulės elektrinės konvertuojamas elektros energijos kiekis priklauso nuo saulės spindulinės energijos, pasiekiančios žemės atmosferos paviršių. Saulės spinduliavimo galingumas į tam tikrą paviršiaus tašką kinta ne tik nuo saulės padėties dangaus skliauto taške, bet ir dėl kintančių klimato sąlygų. Todėl saulės spindulinės energijos kiekis pasisikirsto netolygiai. Didžiausias saulės intensyvumas yra gegužės, birželio, liepos mėnesiais. Mažiausias – gruodžio, lapkričio, sausio mėnesiais. Tai lemia netolygų saulės elektrinės generuojamą elektros energijos kiekį. Praktiniam saulės energijos naudojimui atliekami saulės energijos srautų perskaičiavimai į tam tikrą kampą saulės atžvilgiu pasvirusį paviršių. Tačiau didžiausias saulės energijos kiekis gaunamas naudojant įvairių konstrukcijų įrangą, kuri leidžia dienos metu saulės fotoelektrinių modulių aktyvų paviršių nukreipti statmenai saulės spinduliams.

Elektros energijos gamybos dinamika per parą įvairiais metų periodais pavaizduota 4.7 paveiksle.



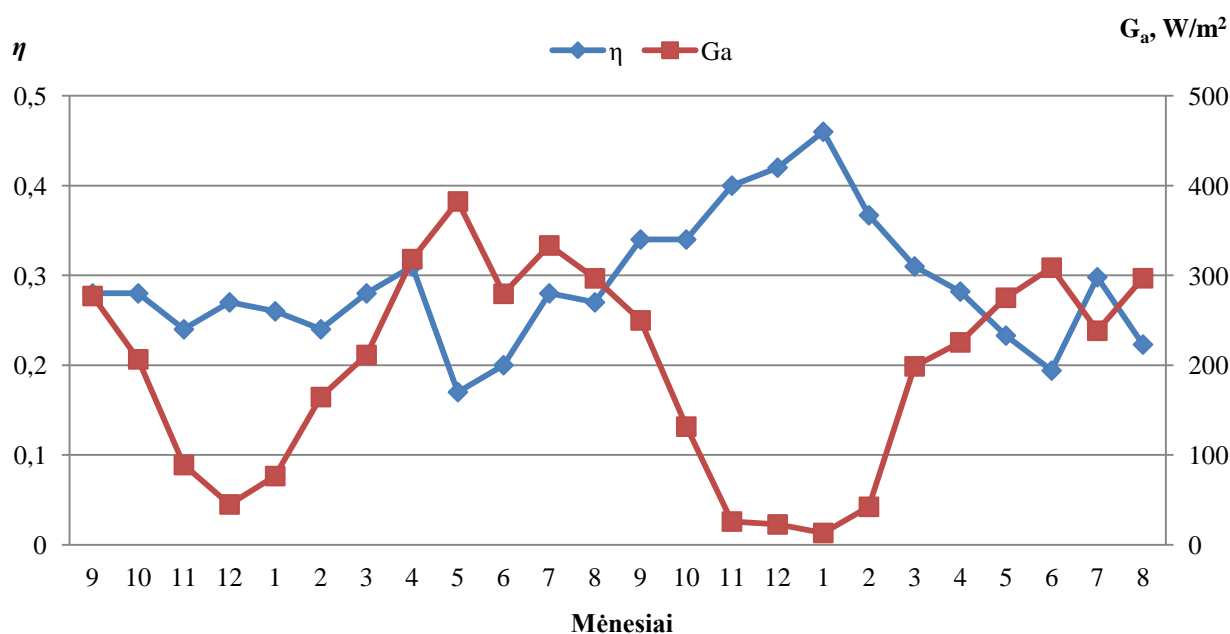
4.7 pav. Elektros energijos gamyba per parą.

Daugiausiai elektros energijos autonominė saulės elektrinė per parą (4.7 pav.) pagamina pavasarį apie 12:00 val. ir siekė apie 260 kWh. Vasaros periodu daugiausiai

elektros energijos buvo pagaminta apie 11:00 val. ir siekė apie 250 kWh. Žiemos periodu daugiausiai elektros energijos yra pagaminama apie 13:00 val. ir siekia apie 120kWh. Rudens periodu daugiausiai elektros energijos buvo pagaminta taip pat apie 13:00 val ir siekė apie 200 kWh. Per parą pagamintos elektros energijos skirtumas tarp vasaros ir žiemos periodų yra apie 1572 kWh, o tai sudaro 350 %.

### 4.3. Autonominės saulės elektrinės išnaudojimo koeficiento ir saulės apšvietos dinamika

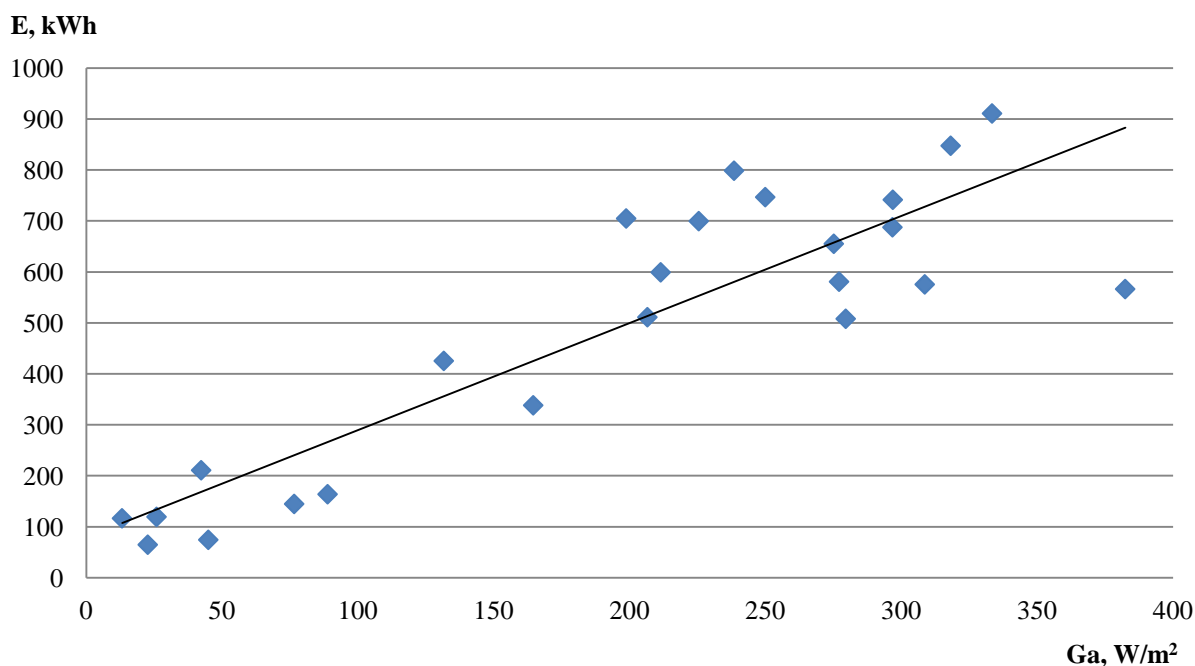
Vidutinė mėnesio saulės energinė apšvieta  $G_a$  (4.8 pav.) 2011 – 2013 metais kito nuo 13,2 W/m<sup>2</sup> (2013 m. sausio mėn.) iki 382,4 W/m<sup>2</sup> (2012 m. gegužės mėn.).



**4.8 pav.** Autonominės saulės elektrinės išnaudojimo koeficiento ir vidutinės saulės energinės apšvietos dinamika 2011-2013 metais

Saulės elektrinės išnaudojimo koeficientas buvo didžiausias žiemos mėnesiais ir siekė - 0,46 (2013 m. sausio mėn.), o mažiausias vasarą (2012 m. gegužės mėn.) – 0,17. Vidutinis autonominės saulės elektrinės išnaudojimo koeficientas per dvejus metus siekia – 0,3.

Remiantis saulės elektrinės pagamintos elektros energijos duomenimis ir vidutinės saulės energinės apšvietos kaita per metus, buvo sudaryta priklausomybė, kuri yra pavaizduota 4.9 paveiksle. Šios priklausomybės koreliacijos koeficientas  $r = 0,88$ , todėl galima teigti, kad tarp  $x$  ir  $y$  yra stipri tiesinė priklausomybė.



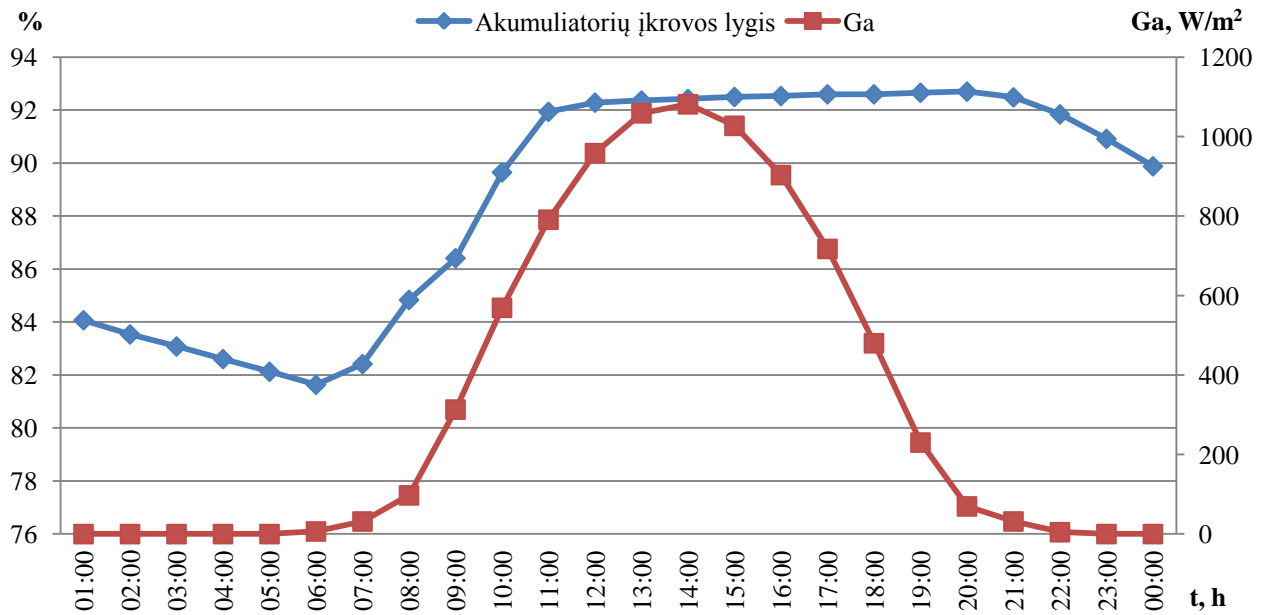
**4.9 pav.** Saulės elektrinės pagamintos elektros energijos priklausomybė nuo vidutinės mėnesio saulės apšvietos

Žiemos laikotarpiu, kai vidutinė mėnesio saulės energinė apšvieta siekia apie  $30 \text{ W/m}^2$ , autonominė saulės elektrinė pagamina apie 100 kWh elektros energijos. Vasaros metu, kai vidutinė mėnesio saulės energinė apšvieta siekia apie  $350 \text{ W/m}^2$ , saulės elektrinė pagamina apie 900 kWh elektros energijos.

#### **4.4. Autonominės saulės elektrinės baterijų įkrovos ir iškrovos dinamika**

Kadangi autonominė saulės elektrinė tamsiu paros metu bei nesant pakankamai saulės apšvietai negali gaminti pakankamo kiekio elektros energijos, jai yra būtinos akumuliatorių baterijos. Baterijos akumuliuoja perteklinę pagamintą elektros energiją šviesiu paros metu, o atiduoda naktimis bei nesant pakankamai saulės apšvietai, kad būtų patenkinti individualaus namo elektros energijos poreikiai ištisus metus.

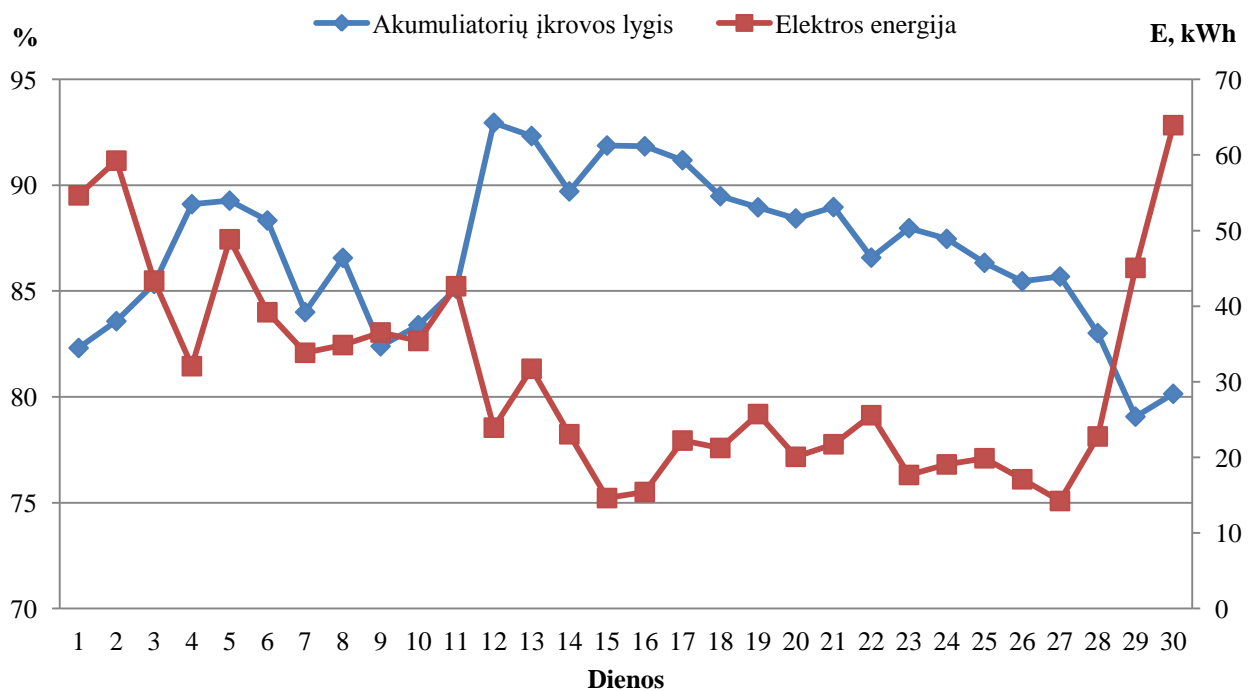
Autonominės saulės elektrinės akumuliatorių baterijų įkrovos ir iškrovos ciklas per parą (2013 m. gegužės 15 d.) pavaizduotas 4.10 paveiksle.



4.10 pav. Akumuliatorių įkrovos lygis per parą

Kaip matome šiame 4.10 paveiksle, kad akumuliatorių baterijų įkrovos lygis tamsiu paros metu, kai saulė nusileidžia ir apšviestumas sumažėja iki  $0 \text{ W/m}^2$  apie 22:00 val. pradeda mažėti ir nuo 93 % sumažėja iki 82 % 06:00 val. Tačiau, kai saulės apšvieta padidėja ir pasiekia apie  $1000 \text{ W/m}^2$  13:00 val. akumuliatorių baterijų įkrovos lygis vėl pasiekia 93%.

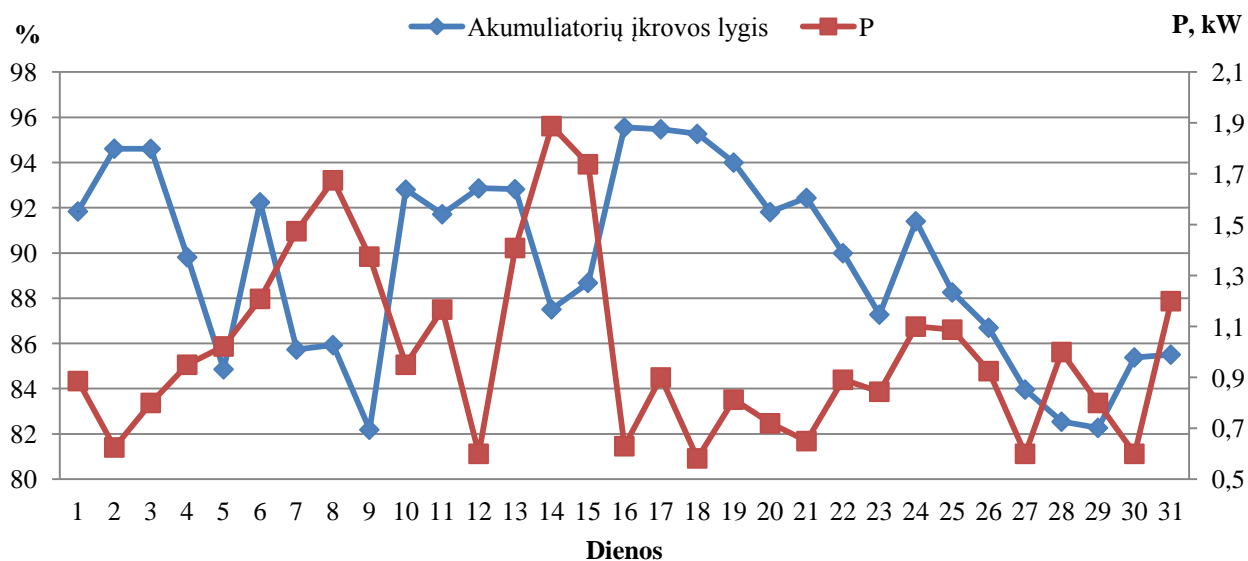
Saulės elektrinės akumuliatorių baterijoms įkrauti reikalingas elektros energijos kiekis per 2013 m. birželio mėnesį pavaizduotas 4.11 paveiksle.



4.11 pav. Akumuliatorių baterijoms įkrauti reikalingas elektros energijos kiekis per mėnesį

4.11 paveiksle matome, kad akumuliatorių baterijoms įkrauti reikalingas elektros energijos kiekis atvirkščiai proporcingas akumuliatorių baterijų įkrovos lygiui. Kaip matome mėnesio pabaigoje yra pastebimas akumuliatorių baterijų įkrovos lygio sumažėjimas, šiam faktui įtaką daro tai, kad buvo sumažėjusi vidutinė dienos saulės energinė apšvieta nuo 300 iki 80 W/m<sup>2</sup>.

Akumuliatorių baterijų įkrovimo metu pareikalaujama galia 2013m. birželio mėnesį pavaizduota 4.12 paveiksle.



4.12 pav. Akumuliatorių baterijoms įkrauti pareikalaujama galia per mėnesį

Akumuliatorių baterijų įkrovos metu pareikalaujamos galios kitimas priklauso nuo akumuliatorių baterijų įkrovos lygio bei saulės energinės apšvietos dydžio (4.12 pav.). Didžiausia pareikalaujama galia 2013 metų birželio 14 dieną siekė 1,8 kW, o šios dienos vidutinė saulės energinė apšvieta buvo apie 950 W/m<sup>2</sup>.

## IŠVADOS

1. Saulės elektrinės (12 kW) didžiausia generuojama galia siekė 10,6 kW 2012 m. liepos mėnesį.
2. Saulės elektrinė per dvejus metus pagamino 25,4 MWh elektros energijos, o gyvenamojo namo elektros energijos poreikiai 7,7 MWh.
3. Per metus gyvenamojo namo elektros energijos poreikiai vidutiniškai siekia 3,85 MWh. Mažiausiai elektros energijos buvo suvartota 2011 metų lapkričio mėnesį 110 kWh, o daugiausiai elektros energijos suvartota 2013 metų sausio mėnesį 648 kWh. Vidutiniškai vieno mėnesio elektros energijos poreikiai yra 321 kWh.
4. Saulės elektrinės išnaudojimo koeficientas buvo didžiausias žiemos mėnesiais ir siekė 0,46 (2013 m. sausio mėn.), o mažiausias vasarą (2012 m. gegužės mėn.) 0,17. Vidutinis autonominės saulės elektrinės išnaudojimo koeficientas per dvejus metus siekia 0,3.
4. Didžiausias akumuliatorių baterijų įkrovos lygis pasiekia apie 94 % esant apie 1000 W/m<sup>2</sup> saulės apšvietai.

### **Mokslinės hipotezės patvirtinimas**

Autonominė saulės elektrinė visiškai patenkina individualaus namo elektros energijos poreikius ištisus metus.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Lietuvos fotoelektros technologijų platforma. Galimybių studija. *Fotoelektros pramonė ir moksliniai tyrimai: poreikis ir perspektyvos*. Vilnius. 2006. P. 65.
2. Lietuvos statistikos departamentas. Energetikos statistika. Prieiga per: <<http://www.stat.gov.lt>> [žiūrėta 2013 m. liepos 15 d.]
3. Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. European Communities, 2001-2012. [žiūrėta 2013-07-10]. Prieiga per: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>
4. Lietuvos fotoelektros technologijų platforma. Strateginių tyrimų planas. *Moksliniai tyrimai ir technologinė plėtra fotoelektros technologijos vizijos įgyvendinimui Lietuvoje*. Vilnius. 2006. P. 59.
5. Solar generation, one billion people and two millions jobs by 2020. P. 52. [žiūrėta 2013 m. Liepos 16 d.] Prieiga per: <[http://www.epia.org/fileadmin/EPIA\\_docs/publications/epia/SG3.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/EPIA_docs/publications/epia/SG3.pdf)>
6. SUTARTIS Nr. 8-504. VšĮ „Perspektyvinių technologijų taikomųjų tyrimų institutas“. *Fotoelektrinio silicio gamybos Lietuvoje galimybių studija*. 2006. P. 58
7. Genutis, A., Gulbinas, A., Navickas, K., Šateikis, I. *Atsinaujinantys energijos šaltiniai*. Akademija: 2008. P. 28 – 33.
8. Optimum Tilt of Solar Panels. MACS Lab. [Žiūrėta 2013 rugpjūčio 20]. Prieiga per: <<http://www.solarpaneltilt.com>>
9. Best Practice Guide for Photovoltaics (PV). Sustainable Energy Authority of Ireland. P. 20. [Žiūrėta 2013 12 10]. Prieiga per: <[http://www.seai.ie/Publications/Renewables\\_Publications/Solar\\_Energy/Best\\_Practice\\_Guide\\_for\\_PV.pdf](http://www.seai.ie/Publications/Renewables_Publications/Solar_Energy/Best_Practice_Guide_for_PV.pdf)>
10. Calculating Inter-Row Spacing. Technical Questions & Answers. *Solar Pro Magazine*. P. 18. [Žiūrėta 2013 06 05]. Prieiga per: <[http://energytrust.org/trade-ally/updates-and-events/InsiderNewsletter/insider-pdfs/100304\\_solarprofessional\\_article.pdf](http://energytrust.org/trade-ally/updates-and-events/InsiderNewsletter/insider-pdfs/100304_solarprofessional_article.pdf)>
11. Wolfe Philip. *Solar Photovoltaic Projects in the Mainstream Power Market*. Routledge. 2012. P. 240. ISBN 978-0-415-52048-5.
12. PV Energy Conversion Efficiency. Solar Energy. [Žiūrėta 2013 07 09]. Prieiga per: <[Solarlux.http://www.eyesolarlux.com/Solar-simulation-energy.htm](http://www.eyesolarlux.com/Solar-simulation-energy.htm)>
13. Ousazadeh Hossain et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13. 2009. P. 1800–1818.
14. Appleyard D. Solar Trackers: Facing the Sun. *Renewable Energy World*. [Žiūrėta 2013 06 05]. Prieiga per: <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/06/solar-trackers-facing-the-sun>>

15. Suri M et al. Solar Electricity Production from Fixed-inclined and Sun-tracking c-Si Photovoltaic Modules. *Proceedings of 1st Southern African Solar Energy Conference Stellenbosch, South Africa. GeoModel Solar, Bratislava, Slovakia.* 2012. P. 21-24.
16. Arnett J.C., and others. Design, installation and performance of the ARCO Solar one-megawatt power plant. *Proceedings of the Fifth International Conference, Athens, Greece. EC Photovoltaic Solar Energy Conference.* 1983. P. 17-21.
17. Shingleton J., One-Axis Trackers – Improved Reliability, Durability, Performance, and Cost Reduction. *National Renewable Energy Laboratory.* 2007. P. 56.
18. Nellis Air Force Base Solar Power System. US Air Force. P. 2. [Žiūrėta 2013 07 08]. Prieiga per: <<http://www.nellis.af.mil/shared/media/document/AFD-080117-043.pdf>>
19. Li, Zhimin et al. Optical performance of inclined south-north single-axis tracked solar panels". *Energy.* Vol. 35. 2010. P. 2511-2516.
20. Saulės elektrinės. [Žiūrėta 2013 06 07]. Prieiga per: <[http://www.saulesvejoenergija.lt/Fotoelektra/SaulesElektrines/&Language=lt\\_LT](http://www.saulesvejoenergija.lt/Fotoelektra/SaulesElektrines/&Language=lt_LT)>.
21. Kok Haw Ong, Siew Lay Lim, Huei Shuan Tan, Hoi Ka Wong, Jun Li, Zhun Ma, Lionel C.H. Moh, Suo Hon Lim, John C. de Mello, Zhi Kuan Chen. A Versatile Low Bandgap Polymer for Air-Stable, High-Mobility Field-Effect Transistors and Efficient Polymer Solar Cells. *Advanced Materials.* Vol. 23. 2011. P. 1409–1413.
22. New ways to harvest light with low-cost photovoltaic materials. [žiūrėta 2013 liepos 16 d.] Prieiga per: <<http://www.physorg.com/news/2011-04-ways-harvest-low-cost-photovoltaic-materials.html>>
23. W. M. Fisher, S. C. Rand. Optically-induced charge separation and terahertz emission in unbiased dielectrics. *Applied physics.* Vol. 109. 2011. P. 254-257.
24. „Swiss cheese“ design enables thin film silicon solar cells with potential for higher efficiencies. [Žiūrėta 2013 06 08]. Prieiga per: <<http://www.physorg.com/news/2011-05-swiss-cheese-enables-thin-silicon.html>>
25. Plastic solar panels: Cheap and flexible set to revolutionize everything from buildings to bus shelters. [Žiūrėta 2013 08 07]. Prieiga per: <<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1350645/Plastic-photovoltaics-set-revolutionise-solar-power-market.html>>
26. Saulės elektrinių pagamintos energijos supirkimo tarifai. Valstybinė kainų ir energetikos komisija. [Žiūrėta 2014 04 27]. Prieiga per: <<http://www.regula.lt/Puslapiai/naujienos/2014-metai/2014-02-27/komisija-patvirtino-2014-metu-II-ketv-fiksuotus-tarifus-energijos-atsinaujinanciu-istekliu-gamintojams.aspx>>

27. Mani, M.; Pillai, R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. P. 3124–3131.
28. Charabi, Y.; Gastli, A. Integration of temperature and dust effects in siting large PV power plant in hot arid area. *Renewable Energy*. 2013. P. 635–644.
29. Nordmann, T.; Clavadetscher, L. Understanding temperature effects on PV system performance. *In: 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan*. 2003.
30. Elminir, H. K.; Ghitas, A. E.; Hamid, R. H.; El-Hussainy, F.; Beheary, M. M.; Abdel-Moneim, K. M. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy Conversion and Management*. 2006. P. 3192–3203.
31. SMA solar technology. 2012. [Žiūrēta 2013 09 10]. Prieiga per: <[http://www.sma-america.com/en\\_US/products/monitoring-systems/sunnysensorbox.html](http://www.sma-america.com/en_US/products/monitoring-systems/sunnysensorbox.html)>.
32. Sunny SensorBox Acquisition of Environmental Data extends the Monitoring of your Solar Power System. User Manual. P. 85-92
33. Pless S., Deru M., Torcellini P. and Hayter S. Procedure for Measuring and Reporting the Performance of Photovoltaic Systems in Buildings. Technical Report NREL/TP-550-38603. *National Renewable Energy Laboratory*. 2005. P. 62.
34. International standard IEC 61724:1998. Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines for Measurement, Data Exchange and Analysis. 1998. P. 20.
35. Martin Coleman, Chi Kwan Lee, Chunbo Zhu, and William Gerard Hurley. State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries. *Ieee Transactions on industrial electronics*. Vol. 54. 2007. P. 2550-2557.

## **MOKSLINIO DARBO APROBACIJA**

*Tyrimų rezultatai paskelbti mokslinėje konferencijoje:*

Ridikas A. Autonominės saulės elektrinės efektyvumo tyrimas. „*Jaunasis mokslininkas 2014*“. Aleksandro Stulginskio universitetas, 2014 m. balandžio 24 d.

*Tyrimų rezultatai paskelbti leidinyje:*

Navickas K., Ridikas A. Autonominės saulės elektrinės efektyvumo tyrimas. *Agroinžinerija ir energetika*. 2014, Nr. 19, P. 128 – 132.

Mokslinio straipsnio kopija pateikta *1 priede*.